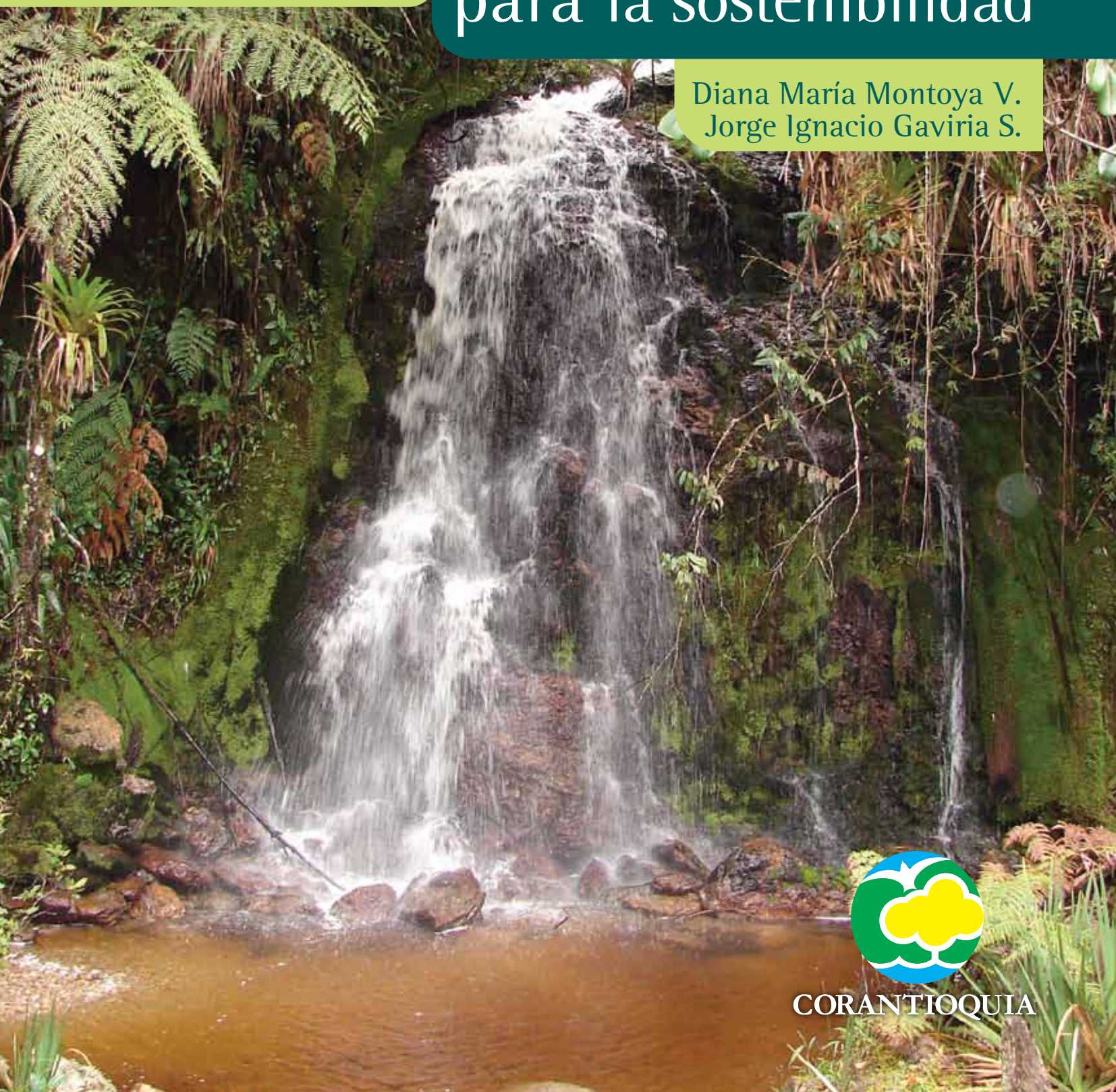
Las aguas subterráneas un recurso vital para la sostenibilidad

Diana María Montoya V.
Jorge Ignacio Gaviria S.



CORANTIOQUIA

Las aguas subterráneas un recurso vital para la sostenibilidad

Diana María Montoya V.
Jorge Ignacio Gaviria S.

Agua subterráneas un recurso vital para la sostenibilidad / Diana María Montoya Velilla y Jorge Ignacio Gaviria Saldarriaga. Medellín: Corantioquia, 2011. 340p. il. Fotos a color, mapas.

ISBN 000000000

Palabras Claves: 1. Aguas subterráneas. 2. Acuíferos. 3. Bajo Cauca (Antioquia). 4. Contaminación. 5. Vulnerabilidad. 6. Río Man 7. Desarrollo sostenible. 8. Riesgos. 9. Corantioquia. 10. Memoria Institucional.

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -Corantioquia

DIRECTOR GENERAI
Luis Alfonso Escobar Trujillo

SUBDIRECTOR CALIDAD AMBIENTAL
Óscar Augusto Mejía Rivera

INVESTIGACIÓN Y TEXTOS
Jorge Ignacio Gaviria Saldarriaga
Diana María Montoya Velilla

FOTOGRAFÍAS
Archivo Corantioquia
Fotos durante las investigaciones

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN
Luisa Fernanda Santa Escobar

EDICIÓN
Marta Salazar Jaramillo
Asesora de Comunicaciones

IMPRESIÓN
Gente visual

Primera Edición
Medellín, Colombia
2011
CORANTIOQUIA
Carrera 65 No. 44A – 32
Medellín, Colombia
PBX 4938888
www.corantioquia.gov.co

Distribución gratuita
Permitida la reproducción parcial o total de esta publicación con fines pedagógicos citando las respectivas fuentes. Publicación elaborada en papel ecológico que en su fabricación ha tomado en cuenta medidas concretas para evitar impactos ambientales sobre el patrimonio natural.

CONTENIDO

Presentación 17

Acerca del texto 19

MODELO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO CIÉNAGA COLOMBIA BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

Diana María Montoya Velilla

	Pág.
INTRODUCCIÓN	29
1. GENERALIDADES	33
1.1. La zona de estudio	35
1.2. Problema y justificación	40
1.2.1. Problema de investigación	40
1.2.2. Justificación	41
1.3. Antecedentes	42
1.4. Objetivos del proyecto	44
1.5. Aproximación metodológica	44
2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE	47
2.1 El modelo hidrológico conceptual y la interacción agua subterránea – humedal	49
2.2 La modelación numérica de sistemas hidrológicos	54
2.2.1 Modelos numéricos de flujo en aguas subterráneas	54
2.2.2 Modelos numéricos de transporte de solutos en aguas subterráneas	55
2.3 El MODFLOW y la plataforma Groundwater Vistas	58
2.3.1 Descripción conceptual del paquete recarga (Recharge package)	60
2.3.2 Descripción conceptual del paquete River (River package)	61
2.3.3 Descripción conceptual del paquete Lake (LAK3 Package)	61
2.3.4 Descripción conceptual del paquete Stream (Stream Package)	62
2.3.5 Descripción conceptual del paquete Wetland (Wetland Package)	63
3. MARCO METODOLÓGICO	67
3.1 Esquema metodológico general	70
3.1.1 Formulación metodológica del modelo hidrológico conceptual	72
3.1.2 Formulación metodológica del programa de monitoreo de variables hidráulicas, hidrometeorológicas y fisicoquímicas	73
3.1.3 Formulación metodológica del modelo hidrodinámico y de transporte de solutos	76
3.2 Materiales y métodos	79
3.2.1 El modelo hidrológico conceptual	79
3.2.1.1 Información disponible	79
3.2.1.2 Herramientas para el procesamiento de la información	80
3.2.2 Diseño e implementación del programa de monitoreo de variables hidráulicas, hidrometeorológicas y fisicoquímicas	82
3.2.2.1 Análisis de los datos hidrometeorológicos y de nivel piezométrico	91
3.2.3 Modelo numérico hidrodinámico y de transporte de solutos	91

	Pág.
4. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LAS INTERACCIONES AGUA SUBTERRÁNEA - HUMEDAL	97
4.1 Caracterización del medio físico natural	99
4.1.1 Fisiografía	99
4.1.2 Hidrografía	101
4.1.3 Clima	112
4.1.4 Edafología	113
4.1.5 Geología	114
4.1.6 Unidades hidrogeológicas	115
4.2 Procesos hidrológicos y balance hídrico	116
4.2.1 Precipitación	116
4.2.2 Temperatura	119
4.2.3 Evapotranspiración	119
4.2.4 Estimación y distribución de la recarga	121
4.2.4.1 Estimación de la recarga neta	121
4.2.4.2 Estimación de la recarga total	126
4.2.5 Escorrentía	129
4.3 Modelo de interacción agua subterránea - agua superficial	134
4.3.1 Superficies freáticas -flujo subterráneo-	134
4.3.2 Modelo esquemático de interacción	141
5. MODELO NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES AGUA SUBTERRÁNEA – AGUA SUPERFICIAL EN LA ZONA DE CAPTURA DEL HUMEDAL CIÉNAGA COLOMBIA	143
5.1 Diseño del modelo	145
5.1.1 Discretización de la malla	145
5.1.2 Definición de condiciones iníciales, de frontera y parámetros semilla del modelo	147
5.2 Implementación y ejecución del modelo numérico de flujo	149
5.2.1 Resultados preliminares y análisis de sensibilidad global	151
5.3 Ajuste al diseño del modelo numérico	153
5.4 Calibración del modelo en estado permanente	154
5.5 Análisis de sensibilidad a los parámetros de calibración	159
5.6 Verificación del modelo en estado permanente	161
5.7 Ejecución y calibración del modelo en estado transitorio	163
5.8 Simulación de escenarios para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia	170
5.8.1 Resultados Escenario 1. Dinámica extractiva del agua subterránea en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia	171
5.8.2 Resultados Escenario 2. Proyecto turístico	174
5.8.3 Resultados Escenario 3. Proyecto abastecimiento de agua	178
5.8.4 Resultados Escenario 4. Proyecto Cambio Climático	182
5.9 Modelo numérico preliminar del transporte de solutos en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia	184
5.9.1 Trayectoria de partículas: modelación advectiva del trasporte de solutos	184
5.9.2 Transporte de solutos por advección – dispersión: lixiviación contaminantes conservativos	189
6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES	193
6.1 Discusión y conclusiones	195
6.2 Recomendaciones	198

DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UN ACUÍFERO LIBRE

Jorge Ignacio Gaviria Saldarriaga

	Pág.
RESUMEN	207
INTRODUCCIÓN	209
1. GENERALIDADES	215
1.1. LA ZONA DE ESTUDIO	217
1.1.1. Antioquia y su Bajo Cauca	217
1.1.2. Cuenca del río Man	219
1.1.2.1 Aspectos hidrogeológicos de la zona de estudio	221
1.1.2.2 Características Económicas	222
1.1.2.3 Características educativas	222
1.1.2.4 Características de Salud	223
1.1.2.5 Características culturales	223
1.1.2.6 Características de los servicios públicos y condiciones de saneamiento básico	223
1.2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	224
1.3. ANTECEDENTES	225
1.4. OBJETIVOS DEL PROYECTO	227
1.5. PREMISA METODOLÓGICA	228
2. ESTADO DEL ARTE	229
2.1. EL PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN Y SUS COMPONENTES	232
2.1.1. La vulnerabilidad intrínseca	232
2.1.2. La carga contaminante. “Amenaza”	234
2.1.3. El peligro a la contaminación	237
2.2. LA VULNERABILIDAD HUMANA	238
2.2.1. Componentes de la vulnerabilidad humana y sus variables	241
2.2.1.1 La exposición	242
2.2.1.2 La fragilidad socioeconómica	245
2.2.1.3 La falta de resiliencia	245
2.2.1.4 Una función que integra los componentes de la Vulnerabilidad humana	246
2.3. EL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	248
3. PROPUESTA METODOLOGICA	251
3.1. METODOLOGIA	253
3.1.1. Determinación del peligro a la contaminación y sus componentes	255
3.1.1.1 Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca	255
3.1.1.2 Evaluación de la carga contaminante	256
3.1.1.3 Evaluación del peligro a la contaminación	257
3.1.2. Determinación de la vulnerabilidad humana y sus componentes	257
3.1.2.1 Evaluación de la exposición	258
3.1.2.2 Evaluación de la fragilidad socio-económica	259
3.1.2.3 Evaluación de la falta de resiliencia	261
3.1.2.4 Evaluación de la vulnerabilidad humana	264
3.1.3. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas	265
	Pág.
3.2. MATERIALES	266
3.2.1. Información para la determinación del peligro	266
3.2.1.1 El modelo hidrogeológico conceptual	266

3.2.1.2 Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero	267
3.2.1.3 Índice de carga contaminante	267
3.2.1.4 Peligro de contaminación	267
3.2.2. Información para la determinación de la vulnerabilidad humana	268
3.2.2.1 Exposición	268
3.2.2.2 Fragilidad socioeconómica	268
3.2.2.3 Falta de resiliencia	269
3.2.2.4 Vulnerabilidad humana	269
3.2.3. Información para la determinación del riesgo a la contaminación	270
3.2.4. Herramientas para la determinación del riesgo y sus componentes.	270
3.2.4.1 Herramientas para la determinación del peligro	271
3.2.4.2 Herramientas para la determinación de la vulnerabilidad humana	272
4. RESULTADOS	275
4.1. DETERMINACIÓN DEL PELIGRO A LA CONTAMINACIÓN Y SUS COMPONENTES	277
4.1.1. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero	277
4.1.2. Carga contaminante	280
4.1.2.1 Desarrollo Urbano	282
4.1.2.2 Producción agrícola	283
4.1.2.3 Producción pecuaria	284
4.1.2.4 Extracción Minera	285
4.1.2.5 Accidentes Ambientales	287
4.1.3. Peligro a la contaminación	288
4.1.3.1 Peligro a la contaminación por actividades de desarrollo urbano	288
4.1.3.2 Peligro a la contaminación por actividades de producción agrícola	289
4.1.3.3 Peligro a la contaminación por producción pecuaria	290
4.1.3.4 Peligro a la contaminación por extracción minera	291
4.1.3.5 Peligro a la contaminación por accidentes ambientales	292
4.2. DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HUMANA Y SUS COMPONENTES	294
4.2.1. Exposición a la contaminación	294
4.2.2. Fragilidad socioeconómica. (FSE)	295
4.2.2.1 Cobertura en servicio de acueducto	296
4.2.2.2 Nivel de educación	296
4.2.2.3 Nivel de ingresos	296
4.2.2.4 Cobertura de atención en salud	297
4.2.2.5 Cultura ancestral	298
4.2.2.6 Fragilidad Socioeconómica	298
4.2.3. Falta de resiliencia. (FR)	299
4.2.3.1 Programas de ordenación territorial y saneamiento	299
4.2.3.2 Programas de educación ambiental	300
4.2.3.3 Programas de prevención y atención de emergencias, relacionadas con la contaminación del recurso hídrico subterráneo	300
4.2.3.4 Existencia de fuentes de abastecimiento alternas	301
4.2.3.5 Existencia de organizaciones sociales	301
4.2.3.6 Falta de Resiliencia	302
4.2.4. Vulnerabilidad humana	303
4.3. DETERMINACIÓN DEL RIESGO A LA CONTAMINACION	305
4.3.1. Riesgo a la contaminación por desarrollo urbano	305
4.3.2. Riesgo a la contaminación por producción agrícola.	305
4.3.3. Riesgo a la contaminación por producción pecuaria	305
4.3.4. Riesgo a la contaminación por extracción minera	305
4.3.5. Riesgo a la contaminación por accidentes ambientales	309
4.4. RIESGO A LA CONTAMINACIÓN TOTAL	310
4.4.1. Riesgo crítico	311
4.4.2. Riesgo promedio	312
4.4.3. Riesgo prevalente	313
5. CONCLUSIONES	315
5.1. RECOMENDACIONES	318

MODELO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO CIÉNAGA COLOMBIA BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

Diana María Montoya Velilla

FIGURAS

Figura 1-1 Localización geográfica de la zona de estudio
Figura 1-2 Espesores del acuífero libre U_{123} en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 2-1 Esquema de interacción y procesos de interconexión entre los compartimentos del ciclo hidrológico
Figura 2-2 Procesos naturales que afectan la interacción GW-SW
Figura 2-3 Tipos de interacción entre las aguas subterráneas y los sistemas de humedales. (Tomado de Winter et al., 1998)
Figura 2-4 Sistema acuífero hipotético discretizado (Modificado de Harbaugh, 2005)
Figura 2-5 Esquema conceptual de flujos en el paquete Wetland
Figura 3-1 Esquema metodológico general para la construcción de un modelo conceptual y numérico de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas (Adaptado de Santa, 2009)
Figura 3-2 Formulación metodológica del modelo hidrológico conceptual de interacción
Figura 3-3 Formulación metodológica del programa de monitoreo
Figura 3-4 Formulación metodológica del modelo hidrodinámico y de transporte de solutos
Figura 3-5 Diagrama metodológico para la construcción de un MDE mejorado
Figura 3-6 Red de monitoreo para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia
Figura 3-7 Estaciones hidrometeorológicas disponibles en la zona de captura de Ciénaga Colombia (Fuente: IDEAM)
Figura 3-8 Relación entre un mapa raster (izq) y un archivo ASCII (der) para trasladar celdas activas e inactivas desde ArcGIS a GV
Figura 3-9 Relaciones entre mapas tipo raster y shape file para exportar la información a GV. (*)
Figura 3-10 Relación entre mapas tipo raster y shape en la definición de atributos con información para exportar a GV. (*)
Figura 4-1 Modelo Digital de Elevación con resolución 10 m para la zona de captura de Ciénaga Colombia (Quintero et al., 2009)
Figura 4-2 Caracterización de la distribución de pendientes en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-3 Localización del Humedal Ciénaga Colombia (Google Earth, 2009)
Figura 4-4 Imagen georreferenciada en la zona de estudio (Landsat 1994 – subescena 954)
Figura 4-5 Hidrografía zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-6 Localización de las muestras para análisis de sedimentos

Figura 4-7 Perfil estratigráfico de los sedimentos del humedal Ciénaga Colombia
Figura 4-8 Distribución de sedimento en el humedal Ciénaga Colombia
Figura 4-9 Batimetría y perfiles topográficos en el humedal Ciénaga Colombia
Figura 4-10 Relación Cota - Volumen humedal Ciénaga Colombia
Figura 4-11 Delimitación de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia
Figura 4-12 Relación entre el nivel de agua del humedal y los piezómetros cercanos
Figura 4-13 Asociaciones de suelos presentes en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-14 Mapa geológico del área de estudio
Figura 4-15 Mapa hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño (Betancur, 2008)
Figura 4-16 Distribución de la precipitación en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-17 Comportamiento de la precipitación en la hacienda La Candelaria
Figura 4-18 Isoyetas de precipitación promedio mensual multianual (mm) - zona de captura Ciénaga Colombia
Figura 4-19 Variación mensual anual de la temperatura (oC) en la estación Cacaoteras del Dique
Figura 4-20 Estimación de la evapotranspiración real por diferentes métodos
Figura 4-21 Puntos de análisis de recarga
Figura 4-22 Relación precipitación vs recarga neta en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-23 Curvas de recesión de nivel piezométrico para la estimación de Δh
Figura 4-24 Relación precipitación - Recarga total en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-25 Modelo de balance hídrico para la estimación de la escorrentía directa en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-26 Estimación de la distribución de caudales para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-27 Sección de aforo caño Ucrania a la salida de la Ciénaga Colombia
Figura 4-28 Superficies piezométricas promedio de invierno (izq.) y verano (der.)
Figura 4-29 Variación del nivel freático registrado durante el periodo de monitoreo agosto 2007 – noviembre 2008
Figura 4-30 Variación del nivel freático promedio mensual en tres estaciones representativas
Figura 4-31 Superficies piezométricas mensuales en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-32 Superficies piezométricas para tres periodos característicos
Figura 4-33 Relación de la variación del nivel piezométrico con respecto a la distribución de la precipitación en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 4-34 Variación de nivel piezométrico y desviación acumulada de la precipitación para el periodo 2008
Figura 4-35 Modelo hidrológico conceptual del sistema hidrológico Ciénaga Colombia. Planta (Arriba) y Corte A-A (Abajo)
Figura 5-1 Discretización de la malla para el zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-2 Espesor de las celdas para la modelación numérica, Sección Oeste – Este a través de la fila 81 entre las columnas 46 y 134
Figura 5-3 Definición de las condiciones de frontera en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Unidad U123 (arriba) y Unidad U4 (abajo)
Figura 5-4 Distribución de la conductividad horizontal en las unidades hidrogeológicas U123 (izq) y Unidad U4 (der)
Figura 5-5 Resultados preliminares del modelo numérico exploratorio en la zona de captura de Ciénaga Colombia (a. Contornos piezométricos promedio, b. Zonas de inundación, c. superficie piezométrica promedio y d. zona con celdas secas)
Figura 5-6 Parámetros de entrada del GV para las condiciones de frontera de la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-7 Superficie freática anual para la zona de captura de Ciénaga Colombia vs. resultados preliminares modelación numérica exploratoria

Figura 5-8 Análisis de sensibilidad global al modelo numérico exploratorio
Figura 5-9 Modelo numérico con tamaño de celda de 25 m en GV
Figura 5-10 Conceptualización del afloramiento de la unidad U4 en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-11 Inclusión de nuevas fronteras River en el modelo permanente (Resolución 25m)
Figura 5-12 Condiciones de calibración de la recarga (m/d) en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-13 Condiciones de calibración para la recarga modelo regional del Bajo Cauca antioqueño (Betancur, 2008)
Figura 5-14 Criterio de convergencia en el error residual vs. % de error en el balance de masa
Figura 5-15 Localización de los puntos de observación – targets- en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-16 Calibración en estado permanente
Figura 5-17 Sensibilidad a la conductividad hidráulica horizontal y vertical para el acuífero libre
Figura 5-18 Sensibilidad a la conductividad hidráulica horizontal y vertical para el acuitardo
Figura 5-19 Sensibilidad a la recarga en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-20 Distribución de las cabezas piezométricas en estado permanente
Figura 5-21 Contornos piezométricos en estado permanente
Figura 5-22 Direcciones de flujo en estado permanente
Figura 5-23 Zonas de inundación en estado permanente
Figura 5-24 Localización de los targets para el proceso de verificación en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-25 Verificación del modelo numérico en estado permanente
Figura 5-26 Localización de los puntos de observación para los periodos de estrés hidrológico
Figura 5-27 Relación cabezas observadas vs Calculadas en estado transitorio
Figura 5-28 Distribución de cabezas piezométricas por periodo de estrés hidrológico
Figura 5-29 Localización de puntos de extracción de agua subterránea en la zona de captura de Ciénaga Colombia (Fronteras tipo BCS Well en GV)
Figura 5-30 Distribución cabezas piezométricas con y sin bombeo en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-31 Distribución de las cabezas piezométricas por aumento en la demanda en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-32 Localización de los puntos de extracción para abastecimiento turístico
Figura 5-33 Análisis de las condiciones hidrogeológicas para la localización del pozo de producción doméstico en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Figura 5-34 Resultados distribución de cabezas piezométricas en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Escenario 2 (SP3_TS_12_358)
Figura 5-35 Nivel piezométrico calculado con y sin bombeo para un punto de monitoreo cercano a al pozo de producción turístico
Figura 5-36 Localización del punto de extracción para abastecimiento del acueducto de Caucasia
Figura 5-37 Análisis de las condiciones hidrogeológicas para la localización del pozo para abastecimiento del acueducto del municipio de Caucasia
Figura 5-38 Resultados distribución de cabezas piezométricas en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Escenario 3 (SP3_TS_12_144)
Figura 5-39 Resultados distribución de cabezas piezométricas por la galería de pozos
Figura 5-40 Resultados de abatimiento en un punto de observación cercano a la batería de pozos
Figura 5-41 Resultados distribución de cabezas piezométricas en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Escenario 4 (SP3_TS_12_144)

Figura 5-42 Localización de la fuente de contaminación asociada a descargas de agua residual desde el caserío de Santa Rosita
Figura 5-43 Resultados modelo advectivo trayectoria de partícula desde Santa Rosita- Estado permanente
Figura 5-44 Resultados modelo advectivo trayectoria de partícula desde Santa Rosita- Estado transitorio
Figura 5-45 Mapa de distribución de la concentración de cloruros. (a) invierno y (b) verano (Santa, 2009)
Figura 5-46 Resultados líneas de flujo hacia el humedal Ciénaga Colombia en estado permanente
Figura 5-47 Usos del suelo en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia
Figura 5-48 Distribución por lixiviación de la concentración de cloruros en el corregimiento de Santa Rosita
Figura 5-49 Distribución por lixiviación de la concentración de mercurio por la práctica de la minería aluvial

TABLAS

Tabla 3-1 Información mínima requerida para la caracterización del medio físico
Tabla 3-2 Información disponible para la construcción del modelo hidrológico conceptual de la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 3-3 Diseño geométrico y ubicación de los piezómetros en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 3-4 Red de monitoreo hidrológico, hidráulico y químico para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 3-5 Lista de colaboradores de la red de monitoreo piezométrico
Tabla 4-1 Clasificación de los sedimentos de las corrientes en la zona de captura
Tabla 4-2 Resultados de permeabilidad en los lechos de las corrientes en la zona de captura
Tabla 4-3 Variación del nivel de agua en el humedal Ciénaga Colombia
Tabla 4-4 Relación Cota- Volumen en el humedal Ciénaga Colombia
Tabla 4-5 Variación del volumen de almacenamiento de agua en el humedal Ciénaga Colombia
Tabla 4-6 Clasificación del clima para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 4-7 Capacidad de campo y punto de marchitez por asociación de suelo
Tabla 4-8 Registros de precipitación promedia mensual multianual (mm) de las estaciones con mayor influencia en la zona de estudio. Fuente: IDEAM – Red monitoreo
Tabla 4-9 Precipitación mensual (mm) registrada durante los años 2007 y 2008 en dos estaciones de observación
Tabla 4-10 Rangos de precipitación promedio mensual multianual en la zona de captura
Tabla 4-11 Registros de temperatura media mensual multianual - Estación Cacaoteras del Dique
Tabla 4-12 Estimación de la evapotranspiración promedia mensual multianual empleando las información de la estación climatológica Cacaoteras del Dique
Tabla 4-13 Estimación mensual de la recarga neta para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 4-14 Relaciones recarga/descarga para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 4-15 Estimación mensual de la recarga total para la zona de captura de Ciénaga Colombia

Tabla 4-16 Estimación del flujo base por el método WTF en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 4-17 Balance hídrico mensual para el periodo diciembre 2007 – noviembre 2008 en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 4-18 Valores de caudal mensual (m^3/s) para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 4-19 Estimación del caudal promedio instantáneo para el Caño Ucrania a la Salida del Humedal Ciénaga Colombia (Febrero 2008)
Tabla 4-20 Estimación de los caudales promedio y mínimo para diferentes periodos de retorno en la zona de captura de Ciénaga Colombia – Modelo DUBERDICUS (2006)
Tabla 4-21 Balance estadístico del funcionamiento de la red de monitoreo piezométrica
Tabla 5-1 Condiciones de frontera para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 5-2 Propiedades hidráulicas promedio de las unidades hidrogeológicas en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 5-3 Parámetros de entrada para las condiciones de frontera en el humedal Ciénaga Colombia – modelo exploratorio-
Tabla 5-4 Parámetros de entrada para las condiciones de frontera en el humedal Ciénaga Colombia- modelo con tamaño de celda de 25 m
Tabla 5-5 Parámetros del método numérico en estado permanente
Tabla 5-6 Análisis de sensibilidad al criterio de convergencia en el error residual -estado permanente-
Tabla 5-7 Intervalos de simulación para la modelación en estado transitorio
Tabla 5-8 Variaciones en los valores de cabeza para las condiciones de frontera entre periodos de simulación
Tabla 5-9 Variaciones en los valores de recarga y evapotranspiración entre periodos de simulación para el estado transitorio
Tabla 5-10 Parámetros del método numérico para la solución del modelo en estado transitorio
Tabla 5-11 Condiciones de almacenamiento para el estado transitorio en cada una de las unidades hidrogeológicas
Tabla 5-12 Puntos de observación – targets- por periodo de estrés hidrológico
Tabla 5-13 Errores de calibración y relaciones entre los valores calculados y observados en estado transitorio
Tabla 5-14 Estimación de caudales de extracción en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Tabla 5-15 Resultados de nivel de agua en el humedal por aumento de la demanda
Tabla 5-16 Abatimiento teórico para el acuífero libre por la acción del pozo de producción
Tabla 5-17 Niveles de agua en el humedal por efecto del bombeo en cada periodo de estrés hidrológico
Tabla 5-18 Niveles de agua en el humedal por efecto del bombeo del pozo de abastecimiento
Tabla 5-19 Abatimientos por efecto de la galería de pozos de abastecimiento
Tabla 5-20 Variaciones por cambio climático en las propiedades de recarga entre periodos de simulación
Tabla 5-21 Niveles de agua en el humedal por efecto del cambio climático en cada periodo de estrés hidrológico
Tabla 5-22 Hidrogramas de comportamiento de cabezas calculadas y observadas en el estado transitorio por efecto del cambio climático
Tabla 5-23 Puntos representativos en cada línea de flujo subterráneo
Tabla 5-24 Velocidades promedio de flujo y reales por trayectoria de partícula

REGISTRO FOTOGRÁFICO

Registro fotográfico 1-1	Unidades geomorfológicas para la zona de captura de Ciénaga Colombia
Registro fotográfico 1-2	Variación del espejo de agua del humedal Ciénaga Colombia. (a) Verano (b) Invierno
Registro fotográfico 1-3	Afectaciones antrópicas en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Registro fotográfico 1-4	Biodiversidad y recursos hidrobiológicos en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Registro fotográfico 3-1	Proceso constructivo de los piezómetros en la zona de estudio
Registro fotográfico 3-2	Colaboradores de la red de monitoreo piezométrico
Registro fotográfico 3-3	Condiciones de acceso para la realización de aforos
Registro fotográfico 3-4	Localización de la mira para la medición del nivel de agua
Registro fotográfico 3-5	Pluviómetros instalados y operados con la comunidad
Registro fotográfico 4-1	Identificación de pequeños humedales en la zona de captura de Ciénaga Colombia
Registro fotográfico 4-2	Características hidrológicas del humedal Ciénaga Colombia
Registro fotográfico 4-3	Formación Cerrito aflorando en el noroeste del humedal Ciénaga Colombia - sector Aduana-

DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UN ACUÍFERO LIBRE

Jorge Ignacio Gaviria Saldarriaga

TABLAS

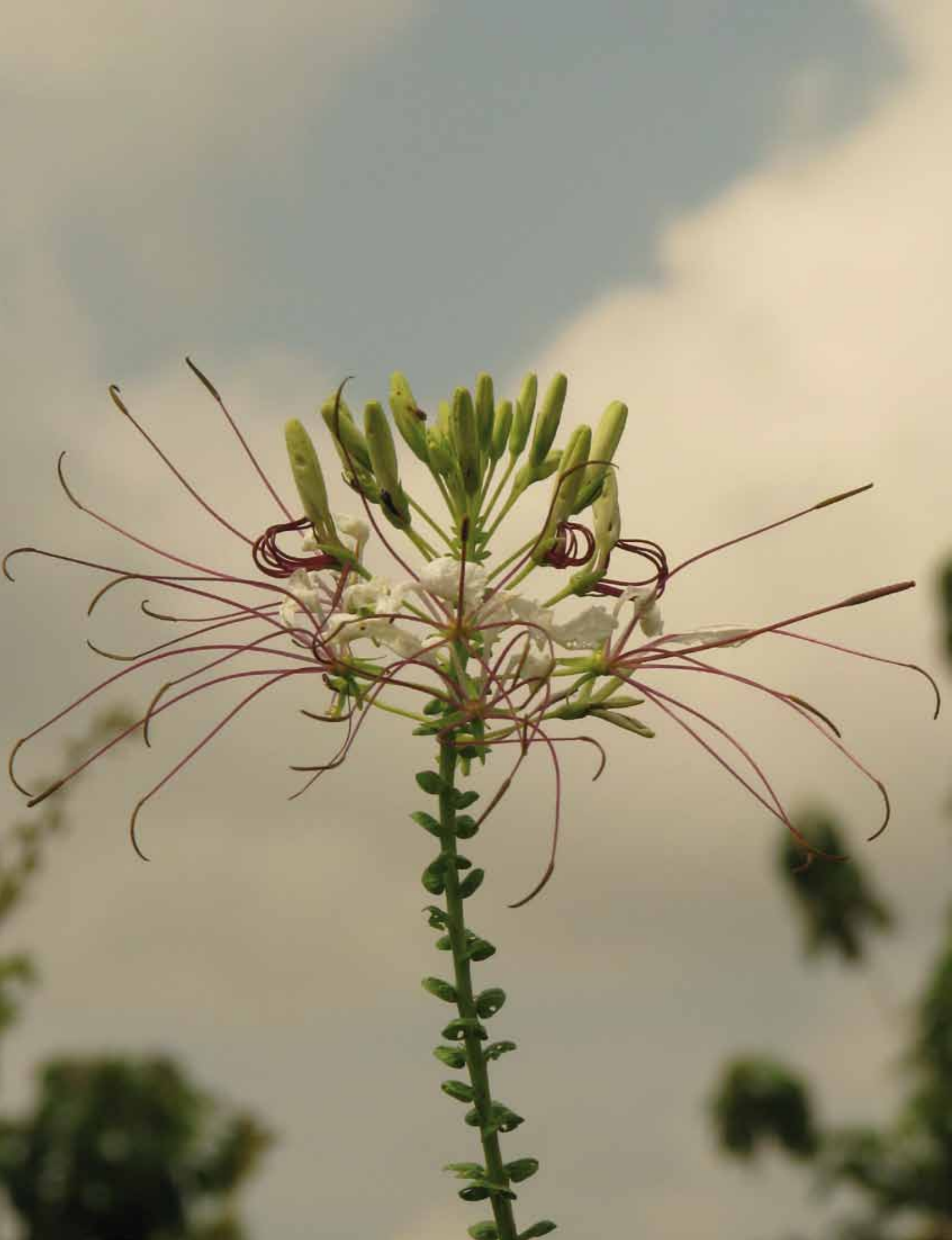
Tabla 1-1	Proyección de la población para el año 2009 en la subregión. Tomada de www.dane.gov.co
Tabla 1-2	Corregimientos, veredas y población de la cuenca baja río Man
Tabla 2-1	Clasificación del Índice de Vulnerabilidad DRASTIC
Tabla 2-2	Rangos y clases de índice de vulnerabilidad
Tabla 2-3	Actividades, subclases y categoría de carga contaminante
Tabla 2-4	Rangos y clases de índice potencial de carga contaminante. (Modificado de Gaviria y Betancur, 2005 y 2006)
Tabla 2-5	Matriz de interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. (Adaptada de Nguyet y Goldscheider, 2006 por Betancur, 2008)
Tabla 2-6	Matriz de observación y comparación de variables, para la vulnerabilidad natural
Tabla 2-7	Matriz de síntesis, sobre variables de exposición y respuesta
Tabla 2-8	Componentes, variables, criterios y unidad de medida en la vulnerabilidad humana
Tabla 3-1	Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero
Tabla 3-2	Matriz de peligro, interacción entre vulnerabilidad intrínseca del acuífero y la carga contaminante
Tabla 3-3	Rangos de densidad poblacional, clase y valor relativo para la exposición
Tabla 3-4	Rangos sin cobertura de acueducto, clase y valor relativo
Tabla 3-5	Rangos sin educación o incompleta, clase y valor relativo
Tabla 3-6	Rangos nivel de ingresos, clase y valor relativo
Tabla 3-7	Rangos sin afiliación o cobertura en salud, clase y valor relativo
Tabla 3-8	Consideraciones de la cultura ancestral, clase y valor relativo
Tabla 3-9	Clasificación de la fragilidad socioeconómica
Tabla 3-10	Consideraciones de ordenamiento y saneamiento, clase y valor relativo
Tabla 3-11	Consideraciones de educación ambiental, clase y valor relativo
Tabla 3-12	Consideraciones prevención y atención, clase y valor relativo
Tabla 3-13	Consideraciones fuentes alternas, clase y valor relativo
Tabla 3-14	Consideraciones organizaciones sociales, clase y valor relativo
Tabla 3-15	Clasificación de la falta de resiliencia
Tabla 3-16	Coeficientes de importancia obtenidos para las componentes de la vulnerabilidad humana
Tabla 3-17	Clasificación del índice de vulnerabilidad humana
Tabla 3-18	Matriz de riesgo, interacción entre la vulnerabilidad humana y el peligro de contaminación

Tabla 3-19 Información de las fichas del SISBEN
Tabla 3-20 Importancia o preferencia y valores
Tabla 4-1 Clases y categorías de actividades potencialmente generadoras de carga contaminante (Tomado de Gaviria y Betancur, 2005 y 2006)
Tabla 4-2 Población, área y densidad poblacional por unidad de análisis
Tabla 4-3 Resultados de la variable cobertura en acueducto
Tabla 4-4 Resultados de la variable nivel de educación
Tabla 4-5 Resultados de la variable nivel de ingresos
Tabla 4-6 Resultados de la variable población sin cobertura en salud
Tabla 4-7 Resultados de la variable cultural, manejo e importancia del agua
Tabla 4-8 Resultados de la componente fragilidad socioeconómica
Tabla 4-9 Resultados de la variable programas de ordenamiento territorial y saneamiento
Tabla 4-10 Resultados de la variable programas de educación ambiental
Tabla 4-11 Resultados de la variable programas de prevención y atención de emergencias
Tabla 4-12 Resultados de la variable fuentes de abastecimiento alternas
Tabla 4-13 Resultados de la variable organizaciones sociales
Tabla 4-14 Resultados de la falta de resiliencia
Tabla 4-15 Resultados de la vulnerabilidad humana según coeficientes de importancia

FIGURAS

Figura 1-1 Mapa de localización de Antioquia y Bajo Cauca
Figura 1-2 Mapa de localización de la Cuenca del río Man y la Zona de Estudio
Figura 1-3 Esquema metodológico para la determinación del riesgo
Figura 2-1 Modelo metodológico para la evaluación del peligro a la contaminación. (Tomado de Betancur, 2008)
Figura 2-2 Esquema conceptual para la evaluación del peligro de los recursos hídricos subterráneos. Tomado de Foster et al, 2002
Figura 3-1 Esquema metodológico para la evaluación del riesgo a la contaminación y sus componentes
Figura 3-2 Formato de encuesta para el inventario de carga contaminante
Figura 3-3 Formato de encuesta, para la recopilación de información socioeconómica y cultural de la población
Figura 3-4 Formato de encuesta realizada para obtener el coeficiente de importancia entre las variables de la vulnerabilidad humana
Figura 4-1 Sustentación y definición de los atributos para la aplicación de la metodología DRASTIC
Figura 4-2 Mapa de vulnerabilidad del medio acuífero, según método DRASTIC
Figura 4-3 Índice potencial de carga contaminante por actividades de Desarrollo Urbano
Figura 4-4 Índice potencial de carga contaminante por las actividades agrícolas
Figura 4-5 Índice potencial de carga contaminante por las actividades pecuarias
Figura 4-6 Índice potencial de carga contaminante por la actividad minera
Figura 4-7 Índice potencial de carga contaminante por los accidentes ambientales
Figura 4-8 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades de Desarrollo Urbano
Figura 4-9 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por producción agrícola
Figura 4-10 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por producción pecuaria

Figura 4-11 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por extracción minería
Figura 4-12 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por accidentes ambientales
Figura 4-13 Mapa de exposición
Figura 4-14 Mapa de fragilidad socioeconómica
Figura 4-15 Mapa de falta de resiliencia
Figura 4-16 Mapa de vulnerabilidad humana
Figura 4-17 Mapa de riesgo a la contaminación por desarrollo urbano
Figura 4-18 Mapa de riesgo a la contaminación por producción agrícola
Figura 4-19 Mapa de riesgo a la contaminación por producción pecuaria
Figura 4-20 Mapa de riesgo a la contaminación por extracción minera
Figura 4-21 Mapa de riesgo por accidentes ambientales
Figura 4-22 Mapa de riesgo a la contaminación total, condición crítica
Figura 4-23 Mapa de riesgo a la contaminación, según clasificación por rangos
Figura 4-24 Mapa de riesgo a la contaminación, según categoría prevalente



Presentación

Corantioquia evidencia una vez más con esta publicación el ánimo, la voluntad y el compromiso de seguir depositando en las manos de todos, textos de gran contenido y buena presentación, así como nuestro interés por las comunidades y la devoción por el cuidado de la naturaleza.

En esta oportunidad, entregamos a la comunidad este libro dedicado exclusivamente a las aguas subterráneas en el bajo cauca antioqueño, el cual hace parte de un conjunto de trabajos que se han adelantado a lo largo de varias investigaciones y esperamos constituya un referente para orientar el devenir de las acciones en torno a este recurso vital.

Este trabajo se basa esencialmente en investigaciones realizadas por la Universidad de Antioquia con el apoyo de Corantioquia, demostrando que en estos años de trabajo conjunto se han formado nuevos investigadores que han empezado a contribuir con valiosos aportes en la temática del agua subterránea, y permiten seguir aprendiendo, construyendo, transformando y consolidando los procesos asociados a la gestión ambiental territorial integral en Antioquia y en el resto del país.

Insistimos en que no sería posible construir estos trabajos sin el concurso y apoyo de muchas personas e instituciones. Una especial gratitud con los habitantes de la región del bajo cauca antioqueño que han colaborado con sus saberes y su compañía en el reconocimiento e identificación de los sistemas hídricos subterráneos y superficiales de su región. Sin duda, merecen nuestra gratitud las instituciones del orden nacional y regional que han aportado información vital para el desarrollo de las investigaciones; destacamos el aporte del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales —IDEAM—; así mismo, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la invaluable participación de la Universidad de Antioquia en este proceso.

Esperamos que éste libro que hoy entregamos a la comunidad regional y nacional, contribuya a seguir trabajando por alcanzar el ideal de desarrollo sostenible que soñamos cada día.

Luis Alfonso Escobar Trujillo
Director General
Corantioquia

Acerca del texto

Hace solo un par de décadas se nos enseñaba a los estudiantes de ingeniería de las universidades de Antioquia, que las aguas subterráneas solo tenían presencia importante en el Urabá Antioqueño y que en el país los mejores acuíferos eran los del valle del Cauca y los de la Sabana de Bogotá.

También se nos enseñaba que el universo de las aguas subterráneas era un espacio reservado solo para unos pocos, eran una o máximo dos, las disciplinas que se encargaban del estudio de esos asuntos subterráneos y a esa especie de reino mágico solo tenían acceso algunos zahories modernos un tanto más tecnificados que los de la edad media.

Aun en la década del 80, creíamos que el agua subterranea además era escasa y generalmente representaba un problema para las obras de ingeniería que requerían excavaciones. Para la minería, las aguas subterráneas siempre han sido un problema incomodo y costoso; para la fundacion de obras civiles representan muchas veces la inestabilidad de la obra o retrasos y sobrecostos en su construcción; para la agricultura han implicado la limitación de tierras productivas de algunos productos; para la ganadería han sido una bendición en épocas de verano y un gran inconveniente en las épocas húmedas.

Pero por fortuna hay cosas que cambian positivamente, la humanidad como conjunto, reconoce hoy la importancia de las aguas subterráneas, no solo porque representan la casi totalidad del agua dulce liquida disponible en la tierra; sino porque hemos sabido reconocer en un recurso oculto a nuestros ojos, la posibilidad de comprender la intrincada trama de la vida y del agua.

En nuestra región, gracias al tesón y compromiso de algunos docentes de las universidades públicas y de algunos funcionarios de entidades ambientales, se ha emprendido un trabajo más motivado por el compromiso que por el apoyo sistemático; no obstante, se han logrado avances maravillosos.

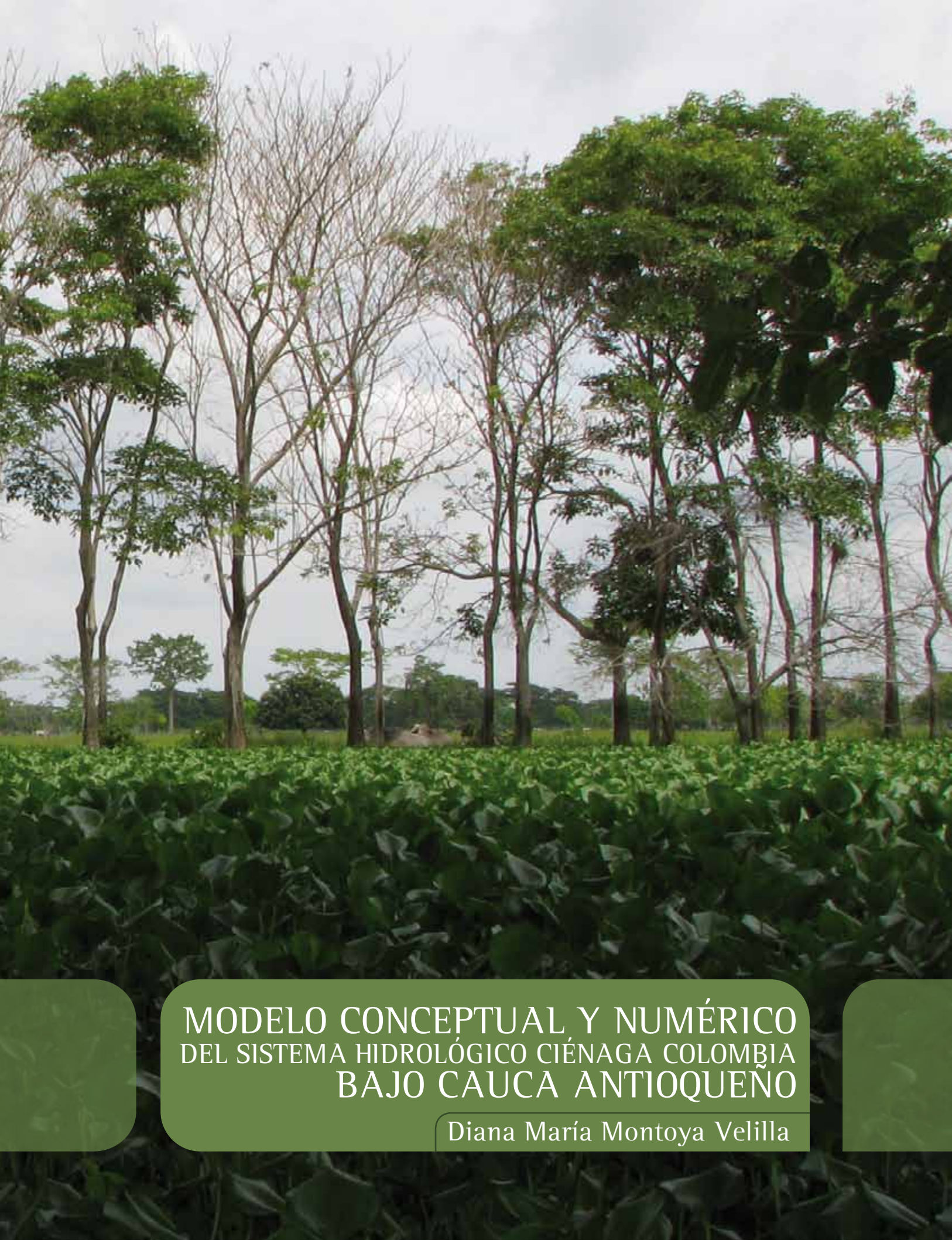
Hoy reconocemos que el agua subterranea no es tan escasa como creíamos, que no representa un problema sino una oportunidad invaluable para todas las necesidades de los seres humanos; que las aguas subterráneas hacen parte del ciclo hidrológico, que no existirían ríos, quebradas, caños, ciénagas y pantanos en las épocas veraniegas, de no ser por la presencia e interrelación de las aguas escondidas bajo el suelo con las aguas que escurren por la tierra y con las que caen generosas desde el cielo.

Hemos aprendido también que la hidrología subterránea es un universo al que se requiere converjan todas las disciplinas y oficios: químicos, geólogos, ingenieros de todas las ramas, sociólogos, comunicadores, hidráulicos, salubristas, planificadores, abogados, gobernantes, perforadores de pozos, hidrólogos y lo más importante, una comunidad de usuarios del agua subterránea, capacitada y consciente.

Hemos aprendido que todos debemos saber que este recurso existe aunque no se vea, y que las aguas subterráneas siguen siendo un mundo mágico pero que no está reservado a zahoríes o científicos exóticos; sino que debe hacer parte del mundo de la cultura del agua en la que cabemos todos, que su gestión no puede hacerse a pesar de la gente sino con la gente; que en nuestra región somos afortunados con la presencia de esta reserva natural sobre la cual hemos caminado durante tantos años y que solo recientemente, con la guía de maestros sencillos y decididos, empezamos a ver y a comprender.

Este par de trabajos de investigación que aquí se presentan, se ocupan de la interdependencia de las aguas superficiales y las subterráneas y de la necesidad de proteger los acuíferos integrándolos a la planificación ambiental y territorial. Hacen parte de un conjunto de trabajos que la Universidad de Antioquia y Corantioquia han emprendido desde hace varios años en el bajo cauca antioqueño, una bella e importante región donde las comunidades usan este recurso desde mucho antes que se impartieran cursos de hidrogeología en nuestras universidades. Esta síntesis es solo una muestra del camino recorrido, de los aprendizajes logrados, una evidencia de que pueden alcanzarse cosas importantes con nuestra capacidad, empeño, cooperación y decisión bajo una dirección clara, coherente y estructurada.

Óscar Mejía R.



MODELO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO
DEL SISTEMA HIDROLÓGICO CIÉNAGA COLOMBIA
BAJO CAUCA ANTIOQUEÑO

Diana María Montoya Velilla

A mi familia y amigos:
Por su incondicional afecto, paciencia y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a las entidades que facilitaron la información y los medios -técnicos y financieros- para la realización de este proyecto de investigación: Universidad de Antioquia, Dirección de Posgrados, Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Corantioquia y Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA). Igualmente, a cada una de las personas que realizaron valiosos aportes a través de sus proyectos individuales y en las diferentes etapas adelantadas para su desarrollo y finalización.

A los directores del proyecto: Doctores Carlos Alberto Palacio Tobón y Teresita Betancur Vargas.

A los compañeros del grupo GIGA: John Fernando Escobar, Jorge Ignacio Gaviria, Paola Palacio, Angélica Gómez, Diana Santa, Carolina Martínez y Jackeline Correa.

A Jorge Ángel, Óscar Mejía, Claudia Castaño, Jorge López y demás compañeros de la Subdirección de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA.

A la comunidad del Bajo Cauca, por su desinteresada colaboración e inmensa ayuda.

Y finalmente, con especial gratitud, a Don Fidel y Don Lucho, con quienes compartí y aprendí en cada una de las comisiones de campo.

INTRODUCCIÓN

Ahí va, silenciosa
Cargada de misterio
Sí ahí, bajo el prado verde
Bajo el pino del columpio
Junto a la era de las cebollas
Por las raíces de las palmas
Por entre los pies de las bromelias

Va reverdeciendo y nutriendo desde abajo
cada hoja del limón y de guayabo
Surtiendo gota a gota los surcos de los ajos
Recorriendo con ternura
Cada poro de arena mineral
Cada grieta y hendidura
Cada oscura caverna

Sí, ahí va, sin prisa, sin afanes
Guardando las lágrimas del cielo
Acariciando de mar el hipocampo
Reparando sequías a su paso
Surtiendo lagunas y pantanos
Humedeciendo los surcos del arroyo
Inundando de ánimo los pozos

Ahi va, como siempre, desde siempre
Fresca t serena, con olor a caminos
Repleta de esencias y presencias
Manteniendo los órdenes secretos
Y pariendo sin tregua los ríos de La Tierra.

Óscar Mejía Rivera, 2008

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea y el agua superficial no son componentes aislados del ciclo hidrológico, por el contrario, interactúan en una variedad de paisajes y de ambientes geológicos y climáticos. Es necesario avanzar en la comprensión integral de los principios que rigen las interacciones entre los diferentes compartimentos hidrológicos, para poder desarrollar un modelo de administración del agua con criterios de sostenibilidad ambiental.

La zona de captura del humedal Ciénaga Colombia y su área de influencia hídrica, representa un recurso estratégico para los pobladores de la región en cuanto a las funciones ambientales, ecológicas y económicas que desempeña. El aprovechamiento agrícola del suelo, las prácticas de ganadería extensiva y la extracción de metales preciosos, constituyen actividades antrópicas que desde tiempos históricos han impactado la dinámica del sistema natural.

En general, poco se conoce acerca de la compleja dinámica hídrica de este sistema. Su variabilidad hidrológica asociada al régimen monomodal de la zona, origina que en periodo de estiaje, se evidencie una notable disminución de los caudales de las corrientes que alimentan la ciénaga, lo que contribuye a la desecación casi total del humedal y al descenso considerable de los niveles freáticos. En contraste, durante los periodos de intenso invierno, la zona se ve perturbada por grandes inundaciones. Lo anterior, lleva a preguntarse: ¿Cómo son y cómo pueden representarse las interrelaciones hidrodinámicas entre las aguas subterráneas del acuífero libre y las aguas superficiales en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en el Bajo Cauca antioqueño?

Se plantea que: la hidrodinámica del humedal Ciénaga Colombia está fuertemente condicionada por interacciones entre las corrientes de agua superficial y el flujo subterráneo en un complejo entorno hidrológico.

La metodología a seguir para la realización de este proyecto consideró que el conocimiento del medio físico representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrológico conceptual y su posterior modelación numérica de acuerdo con los protocolos existentes. En la actualidad aumenta la frecuencia en el uso de los modelos numéricos exploratorios y de simulación, para la evaluación, ajuste y validación de los modelos conceptuales.

En esta investigación se empleó el software MODFLOW en su adaptación comercial Groundwater vistas versión 4.25 con los módulos lake package, MODPATH y MT3DMS, para simular el flujo de aguas subterráneas desde y hacia el humedal Ciénaga Colombia e interpretar la interacción entre ambos sistemas en los diferentes periodos hidrológicos.

En este documento se presentan los resultados del proyecto de investigación: "**Modelo conceptual y numérico del sistema hidrológico Ciénaga Colombia. Bajo Cauca antioqueño**", el cual hace parte del estudio "Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca antioqueño" que desde el 2006 ejecuta la Universidad de Antioquia con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA).

El desarrollo de un modelo conceptual y numérico que permita explicar las interrelaciones entre los sistemas hídricos superficial y subterráneo de la zona de captura de Ciénaga Colombia, pretende ser una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para el uso, manejo y administración sostenible de este humedal que hace parte del complejo hidrológico de la cuenca del río Man en el Bajo Cauca antioqueño.

El documento se estructura en seis capítulos que en conjunto dan cuenta del trabajo realizado desde el año 2007 hasta el año 2010 en cumplimiento de los objetivos específicos definidos para este proyecto.

En el capítulo primero se presenta una descripción del área objeto de estudio y se exponen las principales generalidades de la zona en los ámbitos geográfico, geológico, hidrológico y sociocultural.

El segundo capítulo hace referencia al marco conceptual y estado del arte de los procesos de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas.

En el capítulo tres se expone el esquema metodológico definido para abordar el estudio integral de la dinámica de interacción entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, particularmente mediante la aplicación de la modelación numérica de flujo y transporte.

Los capítulos cuatro y cinco, desarrollan el camino hacia la formulación del modelo hidrológico conceptual, el modelo numérico de flujo y transporte y la simulación de una serie de escenarios hipotéticos para los cuales se evalúa la respuesta del sistema.

El capítulo sexto y último, presenta a modo de discusión una serie de conclusiones a partir de los resultados obtenidos y algunas recomendaciones para estudios futuros.

1. GENERALIDADES

“Poco se conoce acerca de la compleja dinámica hídrica del humedal Ciénaga Colombia, su relación con las corrientes superficiales que lo alimentan y con el acuífero libre de la región. Su variabilidad hidrológica asociada al régimen monomodal característico del Bajo Cauca antioqueño, origina que en periodo de estiaje (diciembre a marzo) se evidencie una notable disminución de los caudales de las corrientes que, a escala local, alimentan el humedal y el descenso de los niveles freáticos que constituyen su flujo base (Quintero et al., 2009), llegando a la desecación casi total del cuerpo léntico”.

1. GENERALIDADES

Introducción

En este capítulo como contexto, se presenta la descripción general de la zona de captura del sistema hidrológico Ciénaga Colombia, su ubicación geográfica, características físicas, fisiográficas, climáticas, e hidrológicas, así como los aspectos socioeconómicos más relevantes. En el aparte 1.2 se hace referencia al problema y justificación del proyecto de investigación, documentándose las razones que motivaron su desarrollo y aplicación, con el objetivo de avanzar en el conocimiento integral y sistémico de un recurso estratégico para la sostenibilidad de las comunidades y de los ecosistemas naturales. En los numerales 1.3 y 1.4 se exponen los antecedentes y los objetivos propuestos y finalmente, en el numeral 1.5 se realiza una aproximación a la metodología aplicada en el desarrollo de la investigación.

1.1 La zona de estudio

La zona de captura de Ciénaga Colombia, desde donde discurren los flujos superficial y subterráneo que aportan agua al humedal, se encuentra ubicada en la cuenca baja del río Man al noroccidente de la región del Bajo Cauca antioqueño entre los municipios de Caucasia y Cáceres (Figura 1-1), enmarcada entre las coordenadas planas 860.500 y 872.500 de longitud W y 1.364.000 y 1.367.000 de latitud N, según la cartografía básica escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia – IGAC.

El acceso a Ciénaga Colombia se hace por vía fluvial desde Caucasia, en un recorrido de dos kilómetros por el río Cauca hasta la confluencia del río Man y luego, por este, unos seis kilómetros hacia arriba; por vía terrestre, el acceso a la Ciénaga se puede lograr en época de verano a través de una pequeña vía desde la hacienda Marcella.

La fisiografía de la zona corresponde a una topografía suave, con relieves planos y ondulados que varían altitudinalmente entre 50 y 100 msnm, alcanzando pendientes máximas de 7%, cubriendo una extensión total de aproximadamente 84 Km^2.

Un clima cálido-húmedo se registra en la zona con una precipitación promedio anual multianual del orden de 2.600 mm y una temperatura promedio de 28°C, de acuerdo con los registros históricos del Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM (Universidad de Antioquia, 2008).

Registro fotográfico 1-1 Unidades geomorfológicas para la zona de captura de Ciénaga Colombia.

Geomorfológicamente, el entorno de Ciénaga Colombia hace parte de la superficie de erosión Caucasia y las superficies aluviales de los ríos Cauca y Man, identificándose geoformas como: bajos y ciénagas, cargueros, colinas bajas y valles (Universidad Nacional - CORANTIOQUIA, 2002). Los bajos y ciénagas se caracterizan por ser depresiones que permanecen inundadas en periodos largos, guardando una estrecha relación con la dinámica fluvial y las aguas subterráneas. Los cargueros, rasgos de carácter antrópico, se originan debido a la acumulación de material producto de la explotación aurífera que se dio sobre las terrazas que anteriormente constituían estas áreas. Una serie de colinas que se ubican entre los 50 y 100 msnm perfilan el tercer tipo de geoforma mencionado (Registro fotográfico 1-1).

Los cambios físicos, químicos y la actividad orgánica sobre los depósitos y las rocas de la planicie del Bajo Cauca, han dado origen a diferentes asociaciones de suelo con propiedades textuales y estructurales que imponen complejas relaciones entre las fases sólida, líquida y gaseosa que coexisten en estos sistemas y que constituyen factores determinantes de las posibilidades agrológicas de los suelos y de la infiltración y percolación del agua lluvia, para constituir la recarga a los acuíferos y el flujo subsuperficial. Los tipos de suelo identificados en la zona de captura pertenecen a las asociaciones Samán (SHa), Tarazá (TRa) y Margarita (GMbc1-2) (IGAC, 1979).

Los humedales Ciénaga Colombia, Mateguadua, Sabalito, Las Mellizas y Lambedero hacen parte del complejo de humedales de la cuenca baja del río Man (Figura 1-1). Entre ellos, Ciénaga Colombia adquiere gran importancia y carácter estratégico gracias a su alta biodiversidad y belleza escénica; por los recursos hidrobiológicos que le provee a las comunidades asentadas a su alrededor, representado principalmente en recurso pesquero y maderero; y por su influencia a la dinámica hídrica del río Man, al constituirse en su principal afluente y regulador hídrico (Corporación Montañitas - CORANTIOQUIA, 2004).

Ciénaga Colombia hace parte, hidrográficamente hablando, de la cuenca de la quebrada Ciénaga, tributaria del río Man por su margen izquierda. Otras corrientes superficiales que fluyen en la zona de estudio, hacia la quebrada Ciénaga y hacia el humedal, son: la quebrada Los Aburridos y quebrada del Medio. Es conveniente señalar que los habitantes y pescadores de la región no reconocen las corrientes de agua según la nomenclatura IGAC y, para ellos, Ciénaga Colombia es alimentada por tres caños: Ucrania, Aduana y Ciénaga (correspondiendo quebrada Aduana a la denominada por el IGAC quebrada Ciénaga).

Según las exploraciones hidrogeológicas y estudios realizados por la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2003, 2004, 2005 y 2006) y, de acuerdo con el ensamble y síntesis de ellos llevados a cabo por Mejía (2006) y Mejía et al. (2007), la

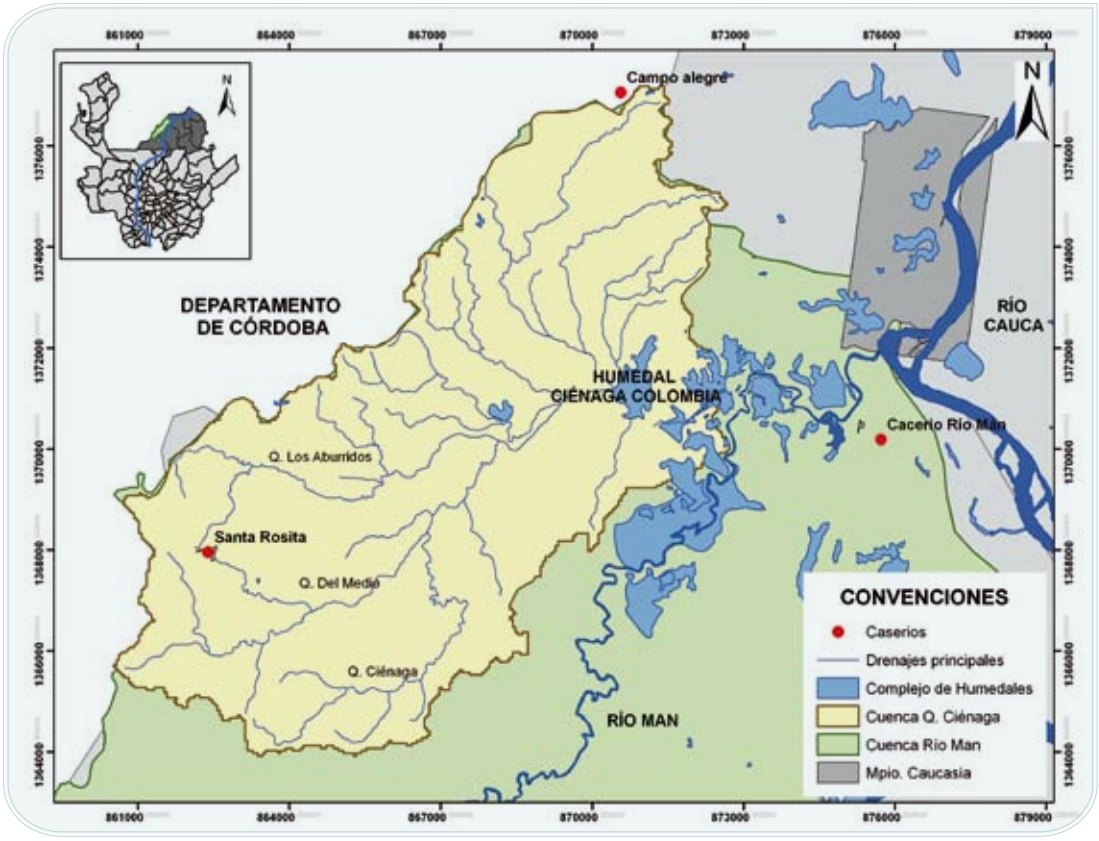


Figura 1-1 Localización geográfica de la zona de estudio

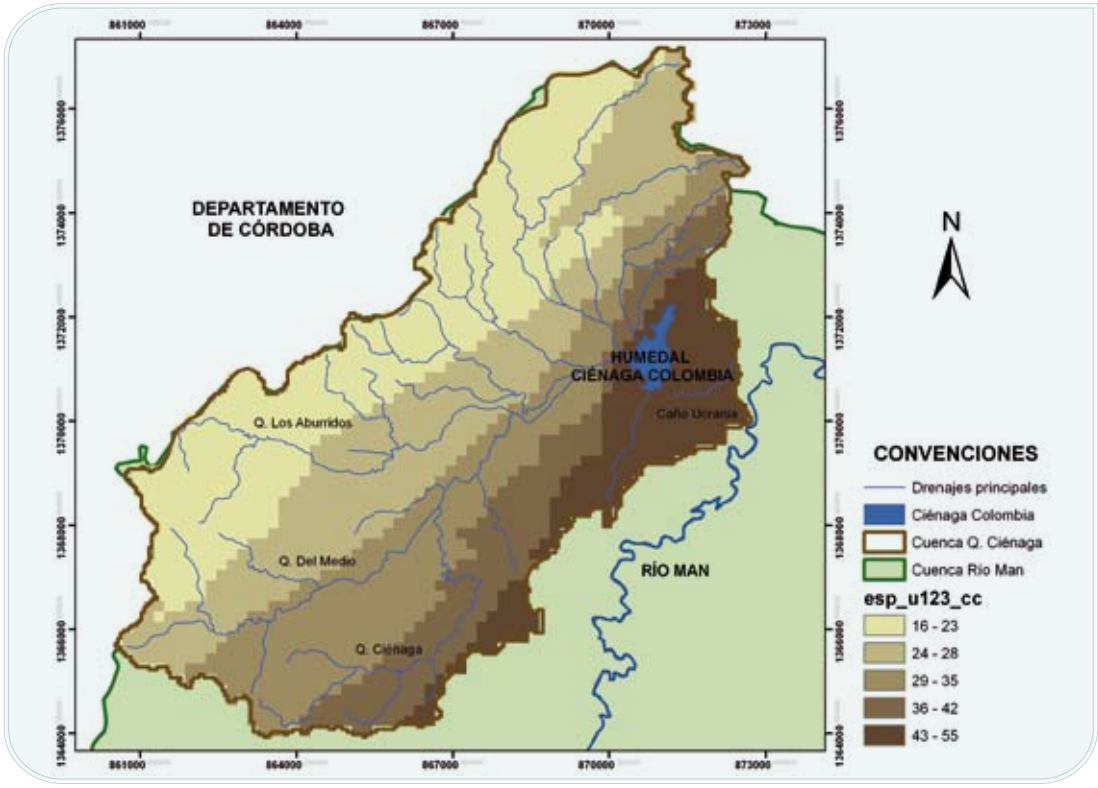


Figura 1-2 Espesores del acuífero libre U_{123} en la zona de captura de Ciénaga Colombia

unidad hidrogeológica de mayor relevancia en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia sería el acuífero libre U_{123}, asociada a los depósitos aluviales recientes y al miembro superior de la formación sedimentaria Cerrito. En esta región, U_{123} tiene espesores que oscilan entre 16 y 55 m (Figura 1-2).

Poco se conoce acerca de la compleja dinámica hídrica del humedal Ciénaga Colombia, su relación con las corrientes superficiales que lo alimentan y con el acuífero libre de la región. Su variabilidad hidrológica asociada al régimen monomodal característico del Bajo Cauca antioqueño, origina que en periodo de estiaje (diciembre a marzo) se evidencie una notable disminución de los caudales de las corrientes que, a escala local, alimentan el humedal y el descenso de los niveles freáticos que constituyen su flujo base (Quintero et al., 2009), llegando a la desecación casi total del cuerpo léntico. Así, en este periodo sólo se insinúa la presencia de este recurso en 0.6 km^2 de superficie con una profundidad que no supera los 0.6 metros. En contraste, durante los periodos de invierno (abril a noviembre), la zona se ve afectada por grandes inundaciones que configuran un espejo de agua de hasta 2 Km^2 y profundidades de 4 metros (Registro fotográfico 1-2). Adicionalmente, durante el curso de la investigación acopiaron evidencias del importante efecto que sobre el sistema local tienen los fenómenos hidrológicos regionales asociados a la dinámica del río Cauca que deberá ser objeto de estudio en futuras investigaciones.

(a) (b)

Registro fotográfico 1-2 Variación del espejo de agua del humedal Ciénaga Colombia. (a) Verano (b) Invierno

Históricamente, este sistema hidrológico ha presentado una alta presión por actividades antrópicas asociadas al aprovechamiento agrícola del suelo, las prácticas de ganadería extensiva, la extracción de metales preciosos y la explotación no planificada del agua subterránea como único medio de abastecimiento doméstico seguro para la población. En los últimos años, la construcción de obras civiles como jarillones, terraplenes y canales de desecación por parte de los terratenientes de la zona para la expansión de la frontera pecuaria (Registro fotográfico 1-3), ha incrementado la presión sobre el sistema; alterando su dinámica hídrica natural y suscitando complejos cambios en las condiciones hidrológicas, hidráulicas y bióticas del mismo.

De acuerdo con los listados de la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN) y Corporación Montañitas - Corantioquia (2004), son muchas las especies de fauna asociadas al humedal Ciénaga Colombia que se encuentran seriamente amenazadas debido a las progresivas intervenciones antrópicas, que han llevado a algunas especies a su total desaparición. En cuanto a la flora, la zona presenta poca cobertura boscosa, que por la acción gradual y permanente de los ganaderos de la zona se ha

Extensión de la frontera pecuaria y construcción de obras civiles

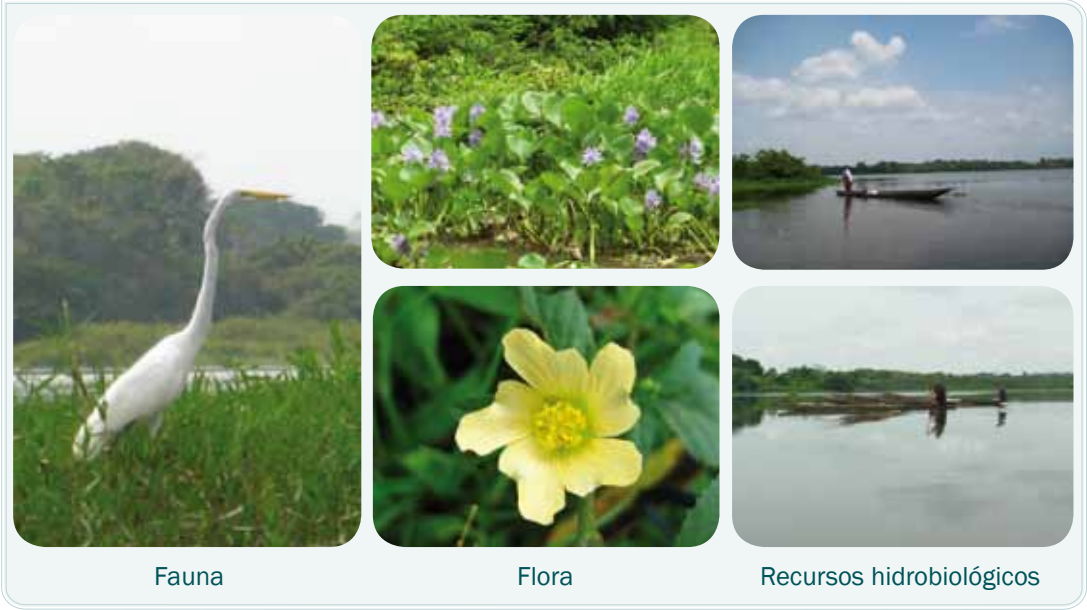
Registro fotográfico 1-3 Afectaciones antrópicas en la zona de captura de Ciénaga Colombia

transformado el paisaje de bosque húmedo tropical (bh-T) (Holdridge, 1979, citado por IDEAM, 2005) a inmensas praderas con pastos mejorados; encontrándose solo algunos fragmentos de rastrojos altos alrededor del espejo de agua y en las zonas de nacimiento de las quebradas que alimentan el humedal. La situación descrita se refleja en la gran cantidad de sedimento que aportan estas áreas al humedal, permitiendo la colonización espacial del espejo de agua con diferentes especies de gramíneas, jacintos y buchones de agua (*Eichornia crassipes y E. azurea*) (Jiménez, 2006), que a su vez, permiten catalogar morfológicamente al humedal como una "cenagueta semicerrada" (Ramírez y Viña, 1998), específicamente por la ubicación en verano de macrófitas acuáticas en las zonas de poco intercambio hídrico, conformando grandes tapones que representan una seria dificultad para su sostenibilidad, con repercusiones negativas de índole social; especialmente para los grupos y asociaciones de pescadores de la región (Registro fotográfico 1-4).

Con respecto a los aspectos socioeconómicos más relevantes, se identifica que la tenencia de la tierra en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia se caracteriza por ser latifundista, con haciendas netamente ganaderas en las cuales escasamente se practica la agricultura de subsistencia por parte de labriegos que trabajan como jornaleros. En esta zona habitan unas 1000 personas dispersas en el área rural y en el caserío de Santa Rosita (Neotrópicos - CORANTIOQUIA, 2001). Esta población en su gran mayoría son jornaleros en las haciendas ganaderas y pertenecen a los estratos socioeconómicos 1 y 2.

En el área de influencia del humedal, se asientan asociaciones organizadas de pescadores -Comité de pescadores Río Man y Ciénaga Colombia- con aproximadamente 120 miembros, que derivan de esta actividad gran parte de su sustento económico.

El humedal Ciénaga Colombia y su área de influencia hídrica, desde y hacia donde discurre su flujo superficial y subterráneo, corresponde al área de estudio donde se pretende evaluar, a partir de la modelación numérica, la interacción del humedal con el agua subterránea del acuífero libre.



Registro fotográfico 1-4 Biodiversidad y recursos hidrobiológicos en la zona de captura de Ciénaga Colombia.

1.2 Problema y justificación

El agua atmosférica, el agua superficial -dispuesta en corrientes, mares, lagos, embalses y ciénagas-, la humedad del suelo, el agua subterránea y sus interrelaciones dentro de un marco hidrogeoecológico que considere factores fisiográficos, geomorfológicos, edafológicos, geológicos, hidrológicos, climáticos y bióticos, constituyen un conjunto de componentes que se articulan para conformar el sistema hidrológico del cual se estudian sus partes o su totalidad (Betancur, 2008).

La presión que el ser humano ejerce sobre los recursos hídricos y el aprovechamiento que de ellos hace para suplir sus necesidades vitales y culturales, crea sobre el sistema hidrológico nuevos factores determinantes -difíciles de cuantificar- que requieren considerarse como elementos articulados a la dinámica de los dominios hidrográficos explorados y por consiguiente, intervienen en el modelo conceptual del sistema. El entendimiento de la complejidad de los sistemas hidrológicos tropicales, agrandada por la intervención antrópica, generan la necesidad de incluir además de los procedimientos técnicos convencionales de exploración y evaluación hidrológica, el uso de técnicas adicionales que permitan avanzar en el conocimiento integral del sistema, representarlo numéricamente y simular los posibles efectos de modificaciones, naturales o inducidos por el hombre, que se sucinten sobre él.

1.2.1. Problema de investigación

Pese a su inmenso valor y funciones económico-ambientales, en general los humedales no han sido considerados como áreas de fomento del progreso sostenible, sino que han sido objeto de la sobreexplotación con prácticas agrícolas no planificadas y de la ocupación humana; lo que ha ocasionado sobre ellos impactos irreversibles y, en ocasiones, hasta su desaparición.

En Colombia, las potencialidades y el gran valor ambiental de los humedales sólo se han comenzado a reconocer en los últimos tiempos. Su condición de país ecuatorial ha hecho que se de mayor preferencia al estudio y conocimiento de los ecosistemas forestales que a los ecosistemas cenagosos; sin embargo, la entrada en vigencia de convenios internacionales como RAMSAR, ha despertado gran interés y ha servido de sustento teórico en la búsqueda de un mejor entendimiento de dichos ecosistemas, sus problemáticas, importancia en la articulación de las relaciones de tipo biótico y sus posibilidades de conservación y recuperación (Caballero, 2001).

En la complejidad de los humedales se conjugan muchas variables, empezando por las netamente hidrológicas, que provocan cambios cíclicos en la dimensión de la superficie cubierta de agua; contando con las afectaciones de la actividad humana y considerando también aquellas que -relacionadas con las dos anteriores- repercuten en las relaciones biológicas del ecosistema (Kusler et al., 2004).

En la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, la construcción de obras civiles de desecación para la introducción de pastos para la ganadería extensiva, constituye una actividad antrópica que actualmente interviene la dinámica hídrica del sistema natural degradándolo y modificándolo; con la consecuencia casi inmediata de la pérdida de biodiversidad y de los recursos hidrobiológicos asociados.

De acuerdo con las primeras observaciones de campo, la dinámica hidrológica entorno al humedal Ciénaga Colombia es bastante compleja y está fuertemente influenciada, no solo por los regímenes hidrológicos locales sino también por la dinámica regional de la escorrentía a lo largo del río Cauca.

1.2.1. Justificación

Para contribuir a la conservación y protección de los sistemas y recursos naturales, se precisa del conocimiento de su naturaleza y dinámica. La investigación, estudio, evaluación y control de los componentes del ciclo hidrológico requiere un amplio conjunto de conocimientos, medios, observaciones y métodos que permitan abordar desde diversos puntos de vista complementarios la complejidad y variabilidad de cada uno de esos componentes, de sus interrelaciones y de su relación con el medio físico, químico y biótico. Difícilmente una única técnica o método simple lleva a resultados seguros, que tengan la confianza de que se trata de una aproximación razonable a la realidad (Custodio y Mook, 2002).

A los métodos físicos e hidrodinámicos, que han sido los desarrollados más tempranamente y los de mayor tradición, se han sumado recientemente los métodos numéricos, que amplían notablemente la panorámica de su comprensión, ya que además de proporcionar enfoques cuantitativos de ciertos procesos del sistema, permiten con frecuencia ajustar y validar los modelos conceptuales y buscar, cuando hace falta, alternativas para nuevas interpretaciones y conceptualizaciones.

Los modelos numéricos se constituyen entonces en una atractiva herramienta de exploración, evaluación, validación o predicción que, utilizada adecuadamente, facilita el direccionamiento de la gestión del recurso hídrico por parte de las autoridades ambientales con relación a la toma de decisiones responsables y el diseño e implementación de medidas efectivas para su sostenibilidad, con la ventaja de no tener que intervenir la zona para conocer tales respuestas. No obstante, en muchos casos requieren grandes volúmenes de información costosos y demandan mucho tiempo para evaluar y correr, y sólo hasta la validación se puede reducir la incertidumbre científica de su predicción.

Como contribución a la búsqueda de la sostenibilidad ambiental de Ciénaga Colombia, se planteó dentro de esta investigación, la construcción del modelo hidrológico conceptual del sistema hidrológico y, a partir de actividades de modelación numérica de flujo, identificar y simular las posibles interacciones entre los compartimientos superficial y subterráneo.

1.3. Antecedentes

Tres aspectos de interés se identifican en relación con lo que podrían llamarse los antecedentes de este trabajo de investigación: i) la importancia de los humedales en el contexto nacional, ii) las iniciativas que desde la Autoridad Ambiental se han emprendido en pro del conocimiento del sistema hidrológico del Bajo Cauca antioqueño y de la sostenibilidad del humedal Ciénaga Colombia, y iii) los aportes al entendimiento de los sistemas naturales con la investigación que se practica en los ámbitos académicos.

Desde finales de la década de los 80 y principios de los 90 se empezaron a gestar en Colombia los primeros pasos para la conservación de los humedales del país. En este sentido, en 1991, durante la Segunda Reunión de los Miembros Sudamericanos de la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza (UICN), realizada en la ciudad de Santa Marta, el Programa Mundial de Humedales de la UICN recomendó la elaboración de la Estrategia Nacional de Conservación de Humedales. Posteriormente, en 1992 se llevó a cabo en Bogotá el Primer Taller Nacional de Humedales, en el cual se constituyó de manera informal un Comité ad hoc con el fin de canalizar acciones tendientes a la conservación de estos ecosistemas. Así mismo, con la creación del Ministerio del Medio Ambiente mediante la Ley 99 de 1993, se instó a la reorganización del sistema nacional encargado de la gestión ambiental y creó una dependencia específica para el tema de humedales, desde la cual se generaron varios documentos preliminares de lineamientos de política y se realizaron los primeros estudios en humedales; resultados que se acopian en la publicación “Humedales Interiores de Colombia, Bases Técnicas para su Conservación y Desarrollo Sostenible” desarrollado por el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander Von Humboldt en 1997.

Sin embargo, solo hasta la entrada en vigencia de convenios internacionales como RAMSAR (1971) -Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas-, y la adhesión de Colombia a partir de 1998 con la designación del sistema Delta Estuarino del Río Magdalena - Ciénaga Grande de Santa Marta, mediante la Ley 357 de 1997, se despertó todo el interés en la búsqueda de lograr un mejor entendimiento de dichos ecosistemas, sus problemáticas, su importancia en las relaciones de tipo biótico y sus posibilidades de conservación y recuperación (Caballero, 2001). Hoy en el país existen cinco sitios RAMSAR que incluyen además de la Ciénaga Grande de Santa Marta, el Complejo de Humedales Laguna del Otún, el Delta del Río Baudó, la Laguna de la Cocha y el Sistema Lacustre de Chingaza, que en total representan 458.525 hectáreas de humedales de los cerca de 20.000.000 de hectáreas que hoy se tienen identificadas para Colombia, representados en ciénagas, pantanos, turberas, madre viejas, lagunas, sabanas y bosques inundados, que proveen múltiples bienes y servicios para el desarrollo de las actividades económicas, así como a las comunidades locales.

Siguiendo este camino, en 2001 el Ministerio del Medio Ambiente formuló el documento de Política para los Humedales Interiores del país en el cual se definen las estrategias para la conservación, manejo, recuperación y uso racional de los humedales y demás ecosistemas hídricos continentales en los ámbitos nacional, regional y

local. Su proceso de formulación, discusión y concertación contó con la participación de las entidades del Sistema Nacional Ambiental (SINA) y de los demás sectores públicos y privados relacionados con el área temática, con el objetivo de identificar las responsabilidades gubernamentales en torno a estos ecosistemas, los problemas que los afectan y las acciones a seguir para su conservación, uso o rehabilitación.

Finalmente, con la expedición de la Resolución 0157 de 2004, por medio de la cual se reglamenta el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la Convención RAMSAR, se determinó la pertinencia de que las Autoridades Ambientales competentes elaboren y ejecuten el Plan de Manejo Ambiental para los humedales prioritarios de su jurisdicción (Resolución 0196 de 2006), el cual a partir de la delimitación, caracterización y zonificación de los humedales, debe definir medidas de manejo que involucren todos los actores, con el propósito de garantizar el uso sostenible y el mantenimiento de su diversidad y productividad biológica.

Por otra parte, en cumplimiento de sus funciones y propósitos misionales, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) se ha comprometido con la búsqueda y trabajo por el conocimiento, como premisa para la gestión, y ha incluido programas, proyectos y actividades relacionados con los recursos hídricos superficial y subterráneo, resaltando también la importancia de los humedales de su jurisdicción.

Específicamente para la Dirección Territorial Panzenú, que corresponde a la región del Bajo Cauca antioqueño, es pertinente citar algunos estudios relevantes que se han desarrollado en ese sentido: i) Tres ejercicios de exploración hidrogeológica realizados con la Universidad de Antioquia (2003, 2004, 2005) y un estudio de validación del modelo hidrogeológico regional del Bajo Cauca mediante técnicas isotópicas (2006), los cuales proporcionaron un modelo hidrogeológico validado para cerca de 3.500 Km^2 del territorio, ii) Con el propósito central de conocer el sistema cenagoso del Bajo Cauca antioqueño y en cumplimiento de la normatividad nacional, se desarrolló inicialmente una identificación de las grandes problemáticas de la planicie y sus sistemas cenagosos a través del estudio realizado por Neotrópicos (2001) conocido como proyecto Visión Panzenú. Este sintetiza las metodologías de valoración económica, valoración ambiental de las ciénagas y valoración del estatus de conservación de las mismas para clasificar los humedales en términos de su potencial para brindar oportunidades de tipo económico en cuanto a la oferta de productos y de su funcionalidad en términos los beneficios ambientales, iii) Los estudios: Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Man (CORANTIOQUIA, 2003) y Plan de manejo del humedal Ciénaga Colombia (Corporación Montañas - CORANTIOQUIA, 2004), los cuales representan intentos iniciales para establecer propuestas de gestión para la recuperación y conservación de estos ecosistemas.

La investigación llevada a cabo desde la Universidad, guiada por la idea que ella debe cumplir con la función de contribuir a la solución de problemas nacionales, regionales y locales, ha realizado importantes aportes metodológicos y resultados concretos en relación con el entendimiento riguroso de sistemas naturales y la aplicación de herramientas de análisis: la modelación numérica y las técnicas hidrogeoquímicas se han utilizado para validar modelos hidrogeológicos (Betancur, 2008); la utilización de metodologías de modelación geoestadística apoyada en herramientas geoinformáticas se ha aplicado exitosamente para mejorar la resolución y escala de Modelos Digitales de Elevación (Quintero, 2008; Quintero et al., 2009); se han propuesto metodologías para la evaluación rápida de la calidad ambiental de humedales (Jiménez, 2006).

Un momento importante dentro de este contexto se da en el 2006 cuando el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) se propone a escala global la definición de una metodología que, apoyada en la aplicación de técnicas isotópicas, permita entender la dinámica de ecosistemas estratégicos como los humedales, pensando en tener de ellos un mejor conocimiento en busca de su sostenibilidad. En ese entonces, y en el marco de esa idea, un humedal en Colombia fue elegido junto con otros 17 en el mundo para adelantar un proyecto piloto de investigación, es así como la Universidad de Antioquia adelanta el estudio: "Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño".

Los resultados del proyecto de: **"Modelo conceptual y numérico del sistema hidrológico Ciénaga Colombia"**, permitieron lograr uno de los objetivos específicos del proyecto marco con el IAEA.

1.4. Objetivos del proyecto

Objetivo General

Desarrollar un modelo conceptual y numérico de las interrelaciones entre los componentes hídricos superficial y subterráneo del sistema hidrológico Ciénaga Colombia en el Bajo Cauca antioqueño -BCa-, generando una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en cuanto al uso, manejo y administración sostenible del recurso hídrico en la cuenca.

Objetivos específicos

Para el desarrollo del proyecto de investigación se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Construir el modelo conceptual que describa las posibles interrelaciones entre las aguas subterráneas y superficiales en la zona de captura y hasta su desembocadura en el humedal Ciénaga Colombia.
- Obtener un modelo numérico de flujo que describa la interacción entre el acuífero libre y el humedal Ciénaga Colombia.
- Simular posibles escenarios hidrológicos para valorar los impactos asociados que puedan comprometer la sostenibilidad del sistema.
- Proponer un modelo preliminar de la dinámica del transporte de solutos, como primera aproximación del fenómeno entre las aguas superficiales y subterráneas en la zona de captura de Ciénaga Colombia.

1.5. Aproximación metodológica

Los datos disponibles y los que se levantan en campo, y la información que de ellos pueda extraerse, representan los insumos para llevar a cabo un procedimiento de análisis que permita dar cumplimiento a los objetivos y alcances planteados. La metodología a seguir para la realización de este proyecto consideró que el conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, edafológicas, climatológicas y geológicas de cada uno de los compartimentos de la región de estudio representan una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrológico conceptual y su posterior modelación hidrodinámica.

La implementación de un modelo conceptual y numérico para simular el flujo de aguas subterráneas desde y hacia el humedal Ciénaga Colombia, supone entonces la realización de una serie de actividades a partir de la cuales se evalúa la información

existente, se reconoce el dominio de estudio, se diseñan e implementan los programas de monitoreo para recolectar nueva información, se realizan los análisis estadísticos, geoespaciales e hidrológicos que permitan analizar su calidad, para finalmente formular un modelo hidrológico conceptual e iniciar paralelamente con las tareas de modelación numérica de tipo exploratoria, siguiendo los protocolos estándar de modelación, que en general parten de la identificación del propósito del modelo -con el cual se identifica la ecuación que gobierna el fenómeno a estudiar-; la selección del código a utilizar -que debe ser previamente probado y verificado-; el diseño del modelo -tipo y tamaño de las celdas, paso de tiempo, condiciones iniciales y de frontera y la selección preliminar de valores para ciertos parámetros-; los protocolos de entrada y salida de datos para ejecutar el modelo; el análisis de sensibilidad global -para identificar nuevas tendencias que permitan refinar o ajustar el modelo conceptual-; la calibración en estado permanente y el análisis de sensibilidad a los resultados del modelo calibrado en estado permanente. Una vez se logra la calibración en estado permanente, es posible iniciar con las ejecuciones en estado transitorio, previa identificación de los periodos de estrés hidrológico, para así continuar con las demás fases de modelación.

Una vez finalizada la etapa de calibración y validación del modelo en estado transitorio, es factible hablar de un modelo de simulación con el cual puede darse inicio a las tareas de modelación de escenarios hipotéticos o posibles, con el objetivo de analizar las respuestas del sistema a eventos naturales o de carácter antrópico, así como poder emprender el acople con otros módulos numéricos para estudiar fenómenos de trasporte de solutos por procesos advectivos, difusivos o químicos en el sistema.

2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

“Pese a su inmenso valor y funciones económico-ambientales, en general los humedales no han sido considerados como áreas de fomento del progreso sostenible, sino que han sido objeto de la sobreexplotación con prácticas agrícolas no planificadas y de la ocupación humana; lo que ha ocasionado sobre ellos impactos irreversibles y en ocasiones, hasta su desaparición”.

2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

2.1. El modelo hidrológico conceptual y la interacción agua subterránea – humedal

Aunque la definición de modelo hidrológico conceptual (MHC) está en construcción por parte de la comunidad científica internacional, puede lograrse una buena aproximación a partir de la definición propuesta por Anderson y Woessner (1992). Un **Modelo conceptual** es una representación pictórica del sistema de flujo del agua que incluye mapas, bloques diagrama y secciones transversales, sobre las que se señalan las características de sus elementos y se describe la naturaleza y magnitud de los procesos que relacionan sus componentes. Este modelo integra la información acerca de las características de los sistemas superficial, atmosférico y subterráneo.

Un MHC siempre estará sujeto a incertidumbre, la cual puede ser controlada con ejercicios sistemáticos de refinamiento soportados en la recolección periódica de nuevos datos, que lleven al mejoramiento, ajuste o incluso a la reformulación del modelo; pero aun así, este nunca representará fielmente al sistema en sus condiciones naturales. La conceptualización de un modelo hidrológico es función del estado del conocimiento, y por tanto cambia continuamente con los avances de la ciencia (Zheng y Bennett, 2002).

Un MHC contiene numerosas interpretaciones cualitativas y subjetivas; la prueba de su validez se logra mediante la aplicación de técnicas de investigación específicas (modelación numérica, hidroquímica e isotopía) que permiten interpretar los procesos y luego comparar los resultados con las observaciones de campo (Betancur, 2008).

Los modelos conceptuales permiten hacerse una idea de cómo funcionan los sistemas hidrológicos y hacer predicciones sobre su comportamiento. Sin embargo, su inherente incertidumbre reafirma el concepto de sorpresa (Bredehoeft, 2005), que alerta sobre sus cambios a medida que se obtiene más y mejor información.

Varios autores han investigado la problemática asociada a la construcción y adecuada selección de un modelo conceptual para representar un sistema natural, proponiendo una estrategia basada en la construcción conceptual-numérica de varios modelos, para luego seleccionar el que mejor se ajuste a las observaciones de campo (Carrera y Neuman, 1986; Sun et al., 1995; Neuman, 2003; Neuman y Wierenga, 2003; Tsai et al., 2003a, b).

El estudio de las interacciones agua superficial – subterránea, exige referirse al ciclo hidrológico; el cual agrupa los compartimentos y los procesos naturales mediante los cuales interactúan entre sí e ininterrumpidamente los flujos de agua, energía y compuestos biogeoquímicos en cada compartimento.

La figura 2-1 ilustra de manera general cada uno de los procesos naturales de interacción que ocurren con el movimiento del agua a través de la atmósfera, la superficie del terreno, el suelo, los ríos y lagos, los sistemas acuíferos y los océanos. Para el entendimiento de cada uno de estos procesos y la administración sostenible del recurso agua, es necesario estudiarlos en un amplio rango de escalas, teniendo en cuenta la variabilidad espacial y temporal de los flujos que ocurren en su interior y en su interacción con los demás compartimentos.

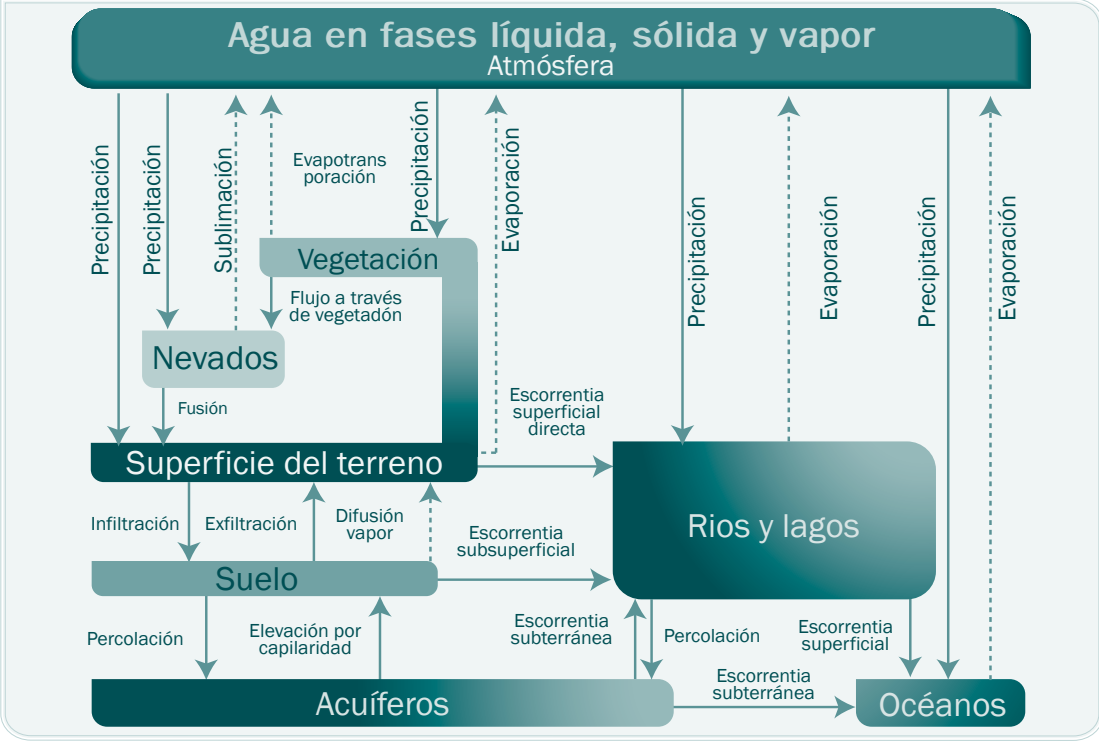


Figura 2-1 Esquema de interacción y procesos de interconexión entre los compartimentos del ciclo hidrológico.
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (2008).

La interacción entre los compartimentos superficial (SW) y subterráneo (GW), está regulada por la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subsuperficial, la infiltración y el flujo subterráneo o recarga. Existen múltiples condiciones naturales que pueden afectar la magnitud y dirección de estos procesos de interacción. La primera de ellas (Figura 2-2a), es la fisiografía de las geoformas donde se presentan las aguas subterráneas y los cuerpos superficiales; desde montañas hasta las zonas planas.

El movimiento del agua en la atmósfera y en la superficie terrestre es más fácil de visualizar y cuantificar en comparación con el movimiento del agua subterránea, donde los tiempos de residencia, dirección de flujo y velocidad, dependen de la heterogeneidad del medio acuífero (configuración litológica, geometría y distribución de las propiedades hidráulicas), lo que genera trayectorias de flujo que varían en longitud y profundidad

desde las áreas de recarga hacia las de descarga (Figura 2-2b). Igualmente, las características granulométricas de los lechos de los cuerpos hídricos superficiales y las condiciones meteorológicas, pueden afectar las trayectorias de infiltración y por ende, la posibilidad de intercambio de agua con el sistema subterráneo (Figura 2-2c).

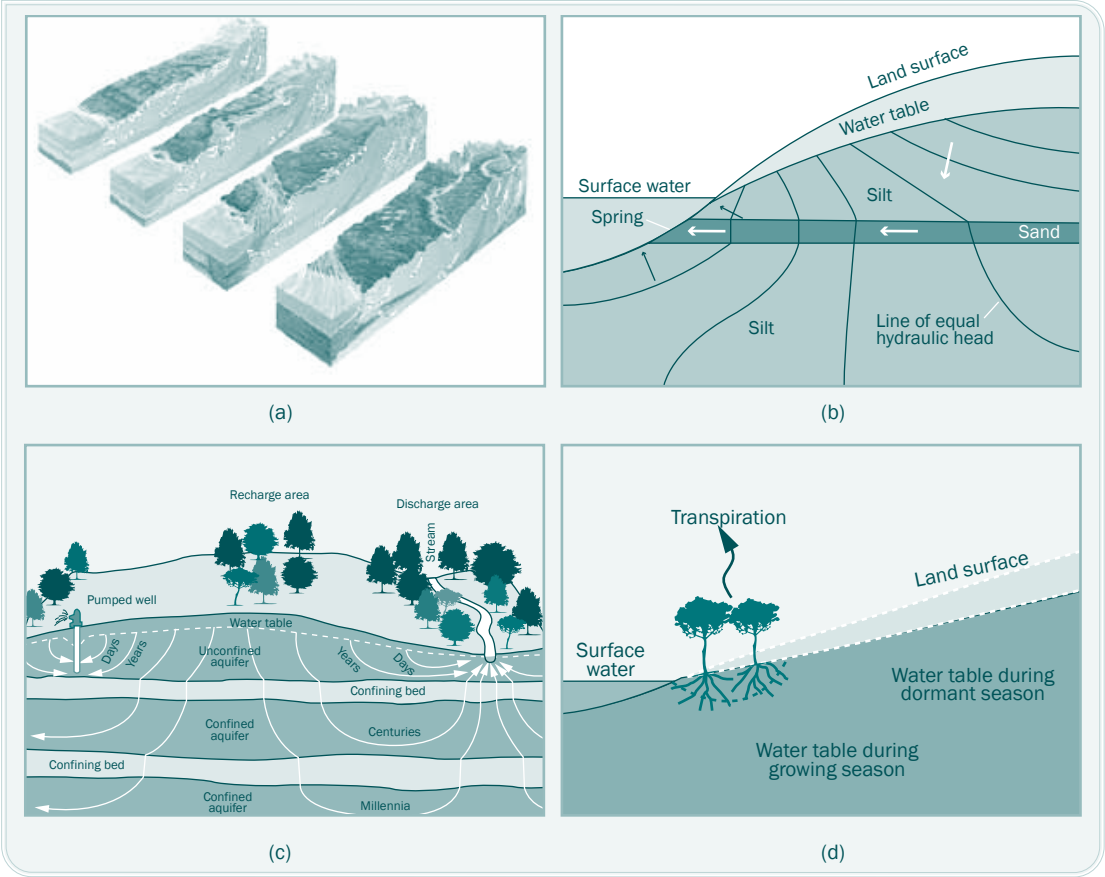


Figura 2-2 Procesos naturales que afectan la GW-SW. Tomado de Winter et al., (1998)

La presencia de vegetación en las zonas de recarga y descarga también afecta la magnitud de los procesos de intercambio de flujo. Las raíces de las plantas (Figura 2-2d) pueden penetrar las zonas saturadas permitiendo que las plantas transpiren agua directamente desde el acuífero. La alta variabilidad diaria y estacional de la transpiración puede resultar en la reducción de la descarga de agua subterránea hacia los cuerpos de agua superficial o causar la circulación de las aguas superficiales en el subsuelo. En muchos lugares es posible medir los cambios diarios en la dirección de las corrientes durante las estaciones de crecimiento activo de las plantas, donde el agua subterránea se mueve hacia el cuerpo superficial durante la noche y el agua superficial se mueve hacia el sistema acuífero durante el día (Winter et al., 1998).

Las interacciones están fuertemente controladas por las presiones relativas del agua y pueden variar significativamente en periodos cortos de tiempo (Jolly et al., 2008) o en escalas de tiempo mayores, por causas como el cambio climático (Anderson y Pint, 2002), modificaciones en el uso del suelo y en la zona riparia (Doble et al., 2006), procesos de regulación, canalización y extracción de agua de las corrientes o por cambios en la geometría de cuerpos hídricos, por su marcado efecto en las velocidades de intercambio de agua (Turner y Townley, 2006).

Las interacciones entre las aguas superficiales y las subterráneas en sistemas de humedales varían espacial y temporalmente en función del flujo multidireccional entre la superficie y la subsuperficie, condicionado principalmente por los procesos de filtración en la zona no saturada, la percolación en la zona saturada y el goteo o ascenso entre capas. El flujo intercambiado puede provenir de la precipitación, de otros cuerpos hídricos superficiales o del transvase de sistemas acuíferos adyacentes.

En términos hidrodinámicos existen cuatro tipos de regímenes de flujo en las interacciones agua subterránea - humedales: (a) Conectado perdiendo el humedal – el humedal recarga el acuífero; (b) Desconectado perdiendo el humedal – similar al anterior, excepto porque el goteo de agua superficial desde el humedal es más lento en las zonas con considerable espesor en la zona no saturada; (c) Flujo a través del humedal – el humedal gana localmente agua desde el acuífero (zona de descarga) y cede en otras partes agua al acuífero (zona de recarga); y, (d) Ganando el humedal – toda la superficie del humedal recibe agua desde el acuífero. Es importante anotar que los humedales pueden presentar uno u otro régimen de flujo dependiendo del cambio temporal de las cabezas en el humedal con respecto al acuífero.

Las diversas formas de interacción son similares a las que ocurren con las corrientes superficiales, pero varían en magnitud debido a que en los humedales se presentan cambios de nivel más lento, mayores tasas de evaporación y un mayor volumen de sedimentos con material orgánico. Su baja permeabilidad puede afectar la infiltración y los intercambios biogeoquímicos de agua y solutos.

Los humedales pueden presentarse en paisajes planos (Figura 2-3A); en zonas con discontinuidades geológicas que pueden favorecer el ascenso del agua subterránea y su afloramiento en superficie (Figura 2-3B); en las partes altas de las cuencas u ocupando grandes extensiones de áreas planas (Figura 2-3D) y en zonas ribereñas a lo largo de grandes corrientes en las zonas con baja velocidad de flujo (Figura 2-3C).

La combinación de los efectos de la precipitación, la evapotranspiración y la interacción de las corrientes superficiales y el agua subterránea, tiene marcados efectos en los patrones de flujo, en los niveles de agua del humedal y en la dependencia o no de estos a algunos de los procesos anteriores. Esta marca hidrológica es conocida como hidroperiodo y se usa para referirse a la amplitud y la frecuencia de las fluctuaciones del nivel de agua; que a su vez, puede afectar algunas características del humedal incluyendo el tipo de vegetación, el ciclo de los nutrientes y la presencia selectiva de invertebrados, peces y aves.

Los humedales son áreas de especial importancia por los beneficios que producen: alta producción de materia orgánica, gran diversidad de especies animales y vegetales, regulación de eventos extremos, retención de nutrientes, la mejora y regularización de la calidad del agua, la conformación y mitigación de la fluctuación del clima local, elevado interés económico para los habitantes por los productos hidrobiológicos que alberga y también como creciente fuente de ingresos por turismo (Custodio, 2001).

Algunos humedales dependen de la lluvia local, de la contribución del agua que escurre desde un área aferente o del agua subterránea. En muchos casos son mixtos o con áreas en las que domina uno u otro origen del agua. No obstante, muchos criterios pueden ser empleados para diferenciar los cuerpos de agua que reciben la descarga de flujos subterráneos, de cuerpos que dependen exclusivamente del agua lluvia (González et al., 1988; González et al., 1989).

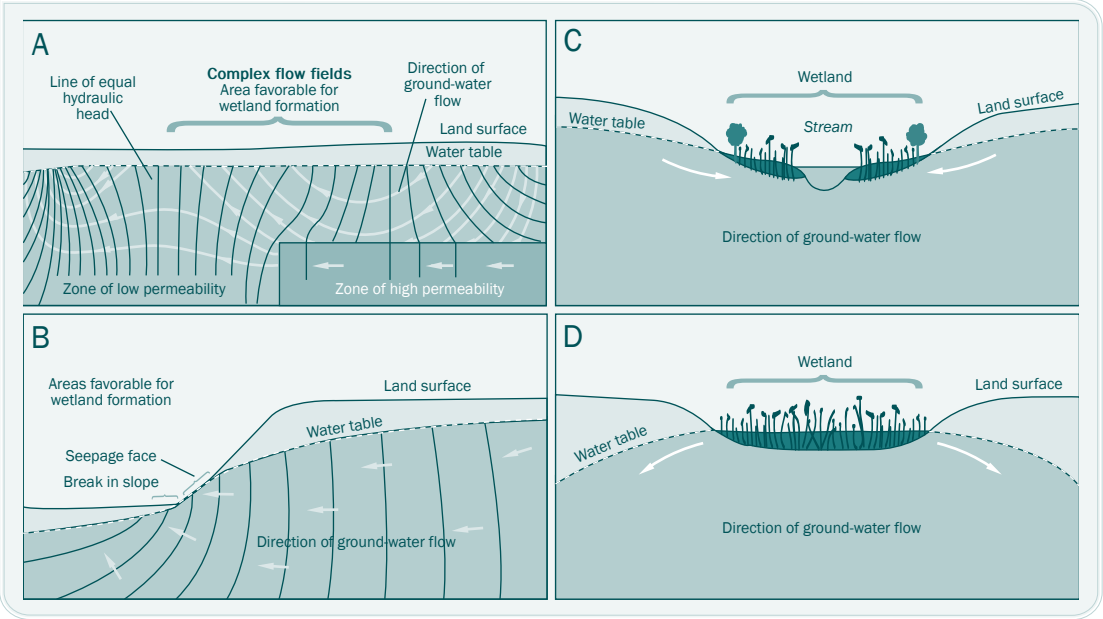


Figura 2-3 Tipos de interacción entre las aguas subterráneas y los sistemas de humedales. (Tomado de Winter et al., 1998)

El régimen de agua de un humedal puede ser deducido de las mediciones piezométricas, precipitación y evapotranspiración, de los niveles de agua y de las salidas o entradas de cuerpos superficiales adyacentes. La mayoría de estas mediciones son difíciles de obtener y no siempre son confiables, normalmente una buena aproximación es obtenida mediante la aplicación del método del balance hídrico. Esta complejidad hidrológica puede favorecer que el humedal pierda agua por infiltración en algunas áreas del lecho y al mismo tiempo reciba entradas netas de agua subterránea a través de otras áreas (Winter, 1881).

La no interconexión con flujos subterráneos y la dependencia del agua meteórica, puede generar humedales localizados en áreas de recarga o en el centro de grandes interflujos. Sin embargo, los humedales son normalmente clasificados como áreas de recarga o descarga del agua subterránea, que corresponde a sistemas de flujo locales, intermedios o regionales. Las áreas de descarga son una pequeña parte del acuífero y tienden a estar localizadas puntualmente o a lo largo de franjas continuas o discontinuas. La filtración vertical de agua subterránea a través de los sedimentos poco permeables de los humedales pueden mantenerlos, retrasar su secado estacional, o crear flujos de descarga locales formando manantiales, lodazales y arenas movedizas (Custodio, 2001).

La mayoría de las aproximaciones a la interpretación de la hidrología de los humedales se ha logrado a partir de la combinación de la hidrología con otras ciencias como la geología, la geomorfología y la hidroquímica. La relación con las aguas subterráneas está condicionada por parámetros como la morfometría, mineralización, turbiedad y régimen de inundación del humedal. Las diferentes contribuciones hídricas incrementan la diversidad del área y las formas de fluctuación como la profundidad, extensión, salinidad y condiciones químicas. La entrada de agua subterránea, es la contribución más permanente, que asegura la existencia de hábitats esenciales para un amplio conjunto de plantas y animales no migratorios.

Los acuíferos que alimentan los humedales también pueden proporcionar recursos hídricos de interés, y muchos de ellos están siendo explotados intensivamente. Esta explotación tiene consecuencias negativas, que en los humedales se traduce en la disminución de la descarga de agua subterránea y el descenso del nivel freático. Esto afecta la entrada de agua al humedal y en algunas áreas el nivel freático y la franja capilar, puede quedar debajo de la profundidad de las raíces de las plantas que son incapaces de seguir profundizando en busca de su fuente hídrica afectando todo el ecosistema (Custodio, 2001).

2.2. La modelación numérica de sistemas hidrológicos

Los modelos numéricos en hidrogeología ofrecen un camino para avanzar en el entendimiento de sistemas acuíferos y, en el estudio de las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas, proporcionan una estructura para sistematizar la información de campo, para responder preguntas sobre el funcionamiento de un sistema y para identificar áreas donde se requiere información adicional (Anderson y Woessner, 1992). Adicionalmente, pueden tener carácter exploratorio y así, pueden acompañar la tarea de construcción de un modelo conceptual desde el momento en que se inicia la recolección de información, en el curso de su interpretación, y cada vez que se obtienen nuevos datos o se aplican nuevos análisis para la validación de un sistema hidrológico.

2.2.1. Modelos numéricos de flujo en aguas subterráneas

Partiendo del sistema de ecuaciones diferenciales parciales que rigen el flujo de agua subterránea y con apoyo de las mediciones de campo e inferencias lógicas, se superpone al dominio hidrológico de análisis un sistema de nodos de acuerdo con la técnica numérica empleada, bien sea: diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos, diferencias finitas integradas, métodos de elementos de frontera o elementos analíticos. Los tres primeros son los procedimientos más usados actualmente para resolver problemas de flujo, siguiendo el protocolo estándar de modelación numérica acoplado a diferentes códigos comerciales ampliamente utilizados, probados y verificados por la comunidad hidrogeológica como el MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984) y GFLOW (Haitjema, 1995).

La combinación matemática entre las ecuaciones de balance de masas y la Ley de Darcy dan lugar a la ecuación que describe el flujo de agua subterránea en condiciones de tiempo variables en un acuífero heterogéneo y anisotrópico (Ec. 2-1).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)+W=S_S\frac{\partial h}{\partial t} \qquad \text{Ec. 2-1}$$

Donde x, y, y z son las coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes principales de los valores de conductividad hidráulica K_{xx}, K_{yy} y K_{zz}; h es la cabeza en el acuífero; W es el flujo por unidad de volumen que representa fuentes o sumideros de agua; S_s es el almacenamiento específico y t es el tiempo.

Cuando el problema del flujo no varía en el tiempo – $\delta h/\delta t=0$ –se dice que el sistema está en condiciones estacionarias o permanentes, de otra manera se habla de estado transitorio. La simulación de flujo en estado transitorio supone una discretización temporal de cabezas en intervalos de tiempo (periodos de stress) durante los cuales las fronteras permanecen invariables. La ecuación 2-1 junto con una serie de condiciones de cabeza o flujo del acuífero y la especificación de cabeza inicial para las fronteras, constituyen una representación matemática del flujo de agua subterránea. La solución de la ecuación proporciona los valores de cabezas en función del espacio y el tiempo, h(x,y,z,t). Exposiciones detalladas acerca de la modelación numérica de flujo subterráneo pueden consultarse en los textos de Wang y Anderson (1982) y Anderson y Woessner (1992).

2.2.2. Modelos numéricos de transporte de solutos en aguas subterráneas

El fenómeno de transporte de solutos, es complementario a la modelación de flujo y está gobernado por los procesos de advección, dispersión y reacciones químicas. La advección se define como el movimiento de un soluto a la velocidad lineal promedio del flujo subterráneo (Ec. 2-2), donde, v es un vector, $\overline{K}$ es el tensor de conductividad hidráulica y n_e es la porosidad efectiva (Sy).

$$v = -\overline{K}/n_e \qquad \text{Ec. 2-2}$$

La dispersión se refiere a la propagación de una sustancia a causa de las reacciones químicas de transformación que sufren el soluto o el medio acuífero. Por esto, un modelo de transporte de solutos debe ser solucionado en espacio y tiempo.

El movimiento de un soluto está influenciado por heterogeneidades locales que causan desviaciones en la velocidad promedio del flujo, las cuales son representadas por una relación similar a la Ley de Fick (Ec 2-3).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x_i}\right) \qquad \text{Ec. 2-3}$$

Donde D_{ij} es el coeficiente de dispersión (Ec. 2-4) y c la concentración.

$$D_{ij} = \alpha_{ijmn}\left(\frac{v_m v_n}{v}\right) + D_d \qquad \text{Ec. 2-4}$$

D_d es el coeficiente de difusión molecular y los componentes α_{ijmn} son coeficientes de dispersividad, que teóricamente representan la mezcla del soluto. Su valor es cero, excepto para $\alpha_{iiii=}\alpha_L$, $\alpha_{iijj=}\alpha_T$ y $\alpha_{ijij=}\alpha_{ijji=}1/2(\alpha_L.\alpha_T)$ para i diferente de j.

Los valores de dispersividad son factores de corrección para tener en cuenta el hecho de que no es práctico y quizá incluso imposible, delinear la distribución de velocidad del medio en detalle. De allí, que tradicionalmente las dispersividades sean estimadas en el proceso de calibración del modelo por ensayo y error o mediante el uso de trazadores (Gelhar et al., 1985). Otro factor que complica la cuantificación de la dispersión es el llamado efecto de escala, a través del cual la dispersividad parece

incrementarse con el tamaño de la pluma contaminante. La presencia de canales preferenciales de flujo o zonas de alta conductividad hidráulica (Desbarats, 1990; Anderson, 1991), no puede ser descrita por el modelo de Fick y requiere un trabajo teórico adicional (Silliman y Wright, 1988).

En lo que respecta a la cuantificación de las reacciones químicas en la subsuperficie, idealmente, todas las reacciones químicas y biológicas posibles deberían ser incluidas en la formulación matemática del fenómeno. Sin embargo, las reacciones químicas más usadas en los modelos de transporte de solutos son la **adsorción**, la **hidrólisis** y **la descomposición o decaimiento** (Ecuaciones 2-5 y 2-6).

$$R_d = \frac{v}{v_c} = 1 + K_d\left(\rho_b/n\right) \qquad \text{Ec. 2-5}$$

$$\frac{\partial_c}{\partial_t} = \lambda_c \qquad \text{Ec. 2-6}$$

Donde R_d representa el factor de retardo, v es la velocidad lineal promedio de flujo subterráneo, v_c es la velocidad del contaminante, K_d es el coeficiente de distribución, ρ_b es la densidad del material poroso, n es la porosidad y λ representa la tasa de decaimiento de primer orden.

El coeficiente de retardo y la tasa de decaimiento de primer orden permiten describir de forma adecuada un problema de contaminación simple. La mayoría de las aplicaciones de modelación han sido limitadas a especies químicas únicas en la que cada término tiene asociada una incertidumbre inherente a la naturaleza química de los procesos que ocurren en la subsuperficie y a la selección de los parámetros que cuantifican esos procesos. (Lewis et al., 1986; Hostetler et al., 1988).

En términos generales, la modelación numérica del transporte de solutos requiere de parámetros difíciles de medir. Los procesos de dispersión y las reacciones químicas que ocurren en la zona no saturada requieren de más investigación para su interpretación y aplicación; lo que le imprime incertidumbre no cuantificable a los modelos de transporte de solutos. La modelación por transporte advectivo se constituye en una atractiva alternativa para el transporte de solutos dado que no involucra los complicados efectos e incertidumbres de la dispersión y las reacciones químicas y permite determinar los promedios de tiempo de viaje, áreas de protección pozos y zonas de captura para contaminantes conservativos, además que permiten el uso de factores de retardo.

La ecuación que gobierna el transporte de solutos, conocida como la ecuación de Advección-Dispersión (Ec. 2-7) puede ser derivada realizando un balance de masa usando las ecuaciones que representan la dispersión (Ec. 2-4) y las reacciones químicas (Ec. 2-5 y 2-6), con la hipótesis que el acuífero es homogéneo, isotrópico, y saturado y que las condiciones de flujo son tales que la ley de Darcy es válida.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial c}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}(cv_i) = R_d\frac{\partial c}{\partial t} + \lambda_c R_d - \frac{C'W^*}{n_e} \qquad \text{Ec. 2-7}$$

Donde c es la concentración y C´ es la concentración conocida de la fuente de contaminación; v_i representa los componentes de vector de velocidad, W^* es el término de fuentes/sumideros y n_e es la porosidad efectiva.

Los códigos de modelación disponibles para el transporte de solutos típicamente consisten en dos submodelos: un submodelo que resuelve la ecuación de flujo y otro resuelve la ecuación de advección – dispersión. La solución de la ecuación de flujo entrega la distribución de las cabezas, desde donde es calculada la velocidad; la cual es un dato de entrada para el submodelo de transporte.

La ecuación 2-7 es difícil de resolver numéricamente, dado que puede causar que las soluciones en diferencias finitas o en elementos finitos sean afectadas por errores numéricos, incluyendo el fenómeno conocido como **dispersión numérica**; que se refiere a la dispersión artificial producto de errores asociados con la discretización del dominio del problema. Para minimizar tales errores, el modelo de malla debe ser diseñado de tal forma que el número de Peclet ($P_e=\Delta l/\alpha$, donde Δl es el espaciamiento nodal y α es la dispersividad) sea menor o igual a 1. No obstante, se han encontrado soluciones aceptables con valores de P_e mayores a 10 (Huyakorn y Pinder, 1983). Se recomienda que el tamaño de la celdas sea tal que $\Delta l=4\alpha$. Igualmente, cuando se realiza la discretización en el tiempo, se debe buscar que el número de Courant ($C=\Delta t/\Delta l$) sea menor o igual que 1. Lo que significa que el paso de tiempo debe ser seleccionado buscando que la relación $\Delta t < \Delta l/v$ o que este sea menor que el tiempo que tarda el soluto en moverse una distancia Δl.

Los módulos de trayectoria de partículas (particle tracking) son usados para trazar las trayectorias de flujo a partir del seguimiento del movimiento que describe una partícula infinitesimal, localizada en un punto específico del modelo de flujo. Los códigos de trayectoria de partículas son postprocesadores de los modelos de flujo, porque este requiere de la distribución de las cabezas piezométricas para calcular la velocidad de distribución mediante la cual se calculan las trayectorias del soluto. Sus resultados son usados para visualizar y analizar el campo de flujo local o regional, áreas de recarga y descarga (Buxton et al., 1990); definir la trayectoria de un contaminante detectado en una fuente; estimar el tiempo requerido para lograr la remediación de un sistema acuífero (Zheng et al., 1991); detectar posibles errores conceptuales y la evaluación de los efectos en la definición de las condiciones de frontera del modelo y delimitar zonas de captura de pozos (áreas de protección), corrientes (Zheng et al., 1988a, b) y/o sistemas lénticos (Townley y Davidson, 1988).

Existen numerosos códigos de amplio dominio público que han sido empleados en la modelación de la trayectoria de partículas y en la solución del transporte de solutos a partir de la ecuación de advección – dispersión, entre ellos se destaca USGS MOC (Konikow y Bredehoeft, 1978), RNDWALK (Prickett et al., 1981), MODPATH (Pollock, 1988, 1989); PATH3D (Zheng, 1989), MT3D (Zheng, 1990) y MT3DMS (Zheng y Wang 1998) para ser usado con MODFLOW; FLOWPATH (Franz y Guiguer, 1990); GWPATH (Shafer, 1987, 1990); WHPA (Blandford y Huyakorn, 1990) y ETUBE (Kincaid, 1988).

Huang et al., (2008), emplearon el modelo de flujo MODFLOW y el modelo de transporte RT3D (Clement, 1997) para abordar el problema asociado a la descomposición de la escala del dominio de estudio, logrando demostrar que los ambientes de procesamiento paralelos producen un ahorro de tiempo computacional entre el 50 y el 80%, comparado con la modelación convencional y que permite simular mallas complejas. Otras aplicaciones de este procedimiento en procesos de remediación pueden ser consultados en Ashby et al., (1999); Garrett et al., (1999); Wai y Lu, (2000); Payne et al., (2003); Watson et al., (2005) y Sinha y Minsker, (2007).

Cuando se desea evaluar problemas de contaminación a gran escala, explicar las heterogeneidades del medio a escala local o representar las interacciones entre las

aguas superficiales y subterráneas, se requiere una malla adecuadamente refinada, especialmente en las áreas cercanas a la fuente de contaminación o donde se pretenda desarrollar un proceso de remediación (Huang et al., 2008). Para solucionar este problema, Dickinson et al. (2007), Mehl y Hill (2002a, 2002b, 2004), y Mehl (2003) desarrollaron un método de malla múltiple que permite la simulación de los fenómenos a escala local con la presencia de fronteras regionales. El método no permite que el dominio completo sea finamente discretizado, como requisito de muchas aplicaciones. Modelos de malla muy finos (celdas de 0,15 a 1 m) han sido necesarios para caracterizar con precisión la interacción entre las aguas superficiales y las subterráneas (Kasahara y Wondzell, 2003; Mehl, 2003). A pesar de que los elementos finitos proporcionan una alternativa, estos modelos no son tan atractivos como los de diferencias finitas, que al ser de tipo modular, ofrecen una mayor flexibilidad en los escenarios simulados.

Carlier (2008) empleó el modelo numérico MT3DMS para simular la dispersión de contaminantes en un medio con porosidad primaria y secundaria. Este modelo utiliza el concepto de porosidad dual para caracterizar medios porosos con gran heterogeneidad o medios comunicantes compuestos por fracturas y poros, donde la porosidad efectiva es usada como la porosidad primaria para los espacios de poro a través de los cuales se mueve el agua y la porosidad secundaria, para los espacios de poro donde el agua queda atrapada o inmóvil.

Davison et al., (2000), investigaron la influencia del tamaño de la malla en la dispersión de contaminantes con el código MT3D. Los propósitos de este estudio eran demostrar la importancia de la resolución espacial en la interpretación transitoria del desarrollo de la pluma de contaminación, así como evaluar la técnica de refinamiento telescópico para incrementar la resolución de los modelos en diferencias finitas. Jones et al., (1998) presenta una relación detallada de los cambios de la dirección de flujo en condiciones transitorias y sus efectos sobre el desarrollo pluma de contaminantes.

Kang et al., (2005), emplearon datos hidrogeoquímicos y características de los sedimentos de un lago y los niveles de agua para cuantificar la infiltración de agua subterránea y el transporte de cloruros desde un medio poroso en el Lago Persommon en La Florida. Los datos mostraron que la concentración de cloruros en el lago varía con la elevación del lago, la cual es controlada principalmente por las entradas de agua subterránea.

Li et al., (2007), usaron MODFLOW y MT3D para comprender la interacción lago – acuífero y modelar la distribución de la descarga de agua subterránea por infiltración y la dinámica de la concentración de cloruros en la cara de infiltración.

La descarga de agua subterránea y su relación con la contaminación ha sido estudiada en sistemas de humedales y lagos (Kang et al., 2005) a partir del uso de trazadores (Corbett et al., 1999; Kolak et al., 1999), infiltrómetros (Belanger et al., 1985) e implementando modelos numéricos (Cheng et al., 2005).

2.3. El MODFLOW y la plataforma Groundwater Vistas

En el desarrollo de este trabajo de investigación se empleó el código MODFLOW en su versión MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000), adaptado a la interfaz comercial Groundwater Vistas v. 4.25 (Rumbaugh y Rumbaugh, 2004).

El MODFLOW es un código computacional para aguas subterráneas en diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y ampliamente utilizado y validado por la comunidad académica en estudios hidrogeológicos. El código resuelve mediante técnicas numéricas iterativas la ecuación diferencial parcial

gobernante para describir el flujo subterráneo (Ec. 2-1). Esta ecuación acoplada a las condiciones de cabeza o flujo en las fronteras del acuífero y la especificación de las condiciones de cabeza inicial, constituyen una representación matemática del sistema de flujo de agua subterránea.

Las condiciones de frontera que permite incluir MODFLOW incluye: cabezas específicas (specified-head), flujo específico (specified-flux) y cabezas dependientes de flujo (head-dependen flux). El modelo tiene una estructura modular que consiste de un programa principal y una serie de subrutinas en módulos o paquetes. Cada paquete representa alguna característica específica del sistema hidrológico como recarga (RCH), evapotranspitación (ETV), ríos (RIVER), Lagos (LAK), drenes (DRN), pozos (WELL) y corrientes (Stream). Desde su desarrollo original han sido incorporados al programa un amplio rango de módulos adicionales, tales como anisotropía variable en el espacio y re-humedecimiento de celdas. Información detallada de este modelo y sus respectivos paquetes se puede consultar en McDonald y Harbaugh (1988), Harbaugh et al., (2000) y documentos técnicos de libre acceso desarrollados por el USGS para MODFLOW.

La discretización espacial en MODFLOW se logra considerando los acuíferos reales como un sistema de malla conformado por celdas, las cuales son caracterizadas en términos de filas (i), columnas (j) y capas (k) (Figura 2-4). Cada celda se considera uniforme con respecto a sus propiedades. Hay un punto por celda denominado nodo, en el cual es calculada la cabeza; dependiendo de la ubicación de los nodos se pueden tener dos configuraciones: bloque central (los nodos están en el centro de las celdas) y punto central (los nodos están en la intersección de las celdas); el flujo de agua subterránea es simulado por MODFLOW usando solo la configuración de bloque central en diferencias finitas (McDonald y Harbaugh, 1988).

La discretización temporal está basada en pasos de tiempo, los cuales se agrupan en periodos de stress. Un periodo de stress es un periodo de tiempo en el cual una serie de parámetros específicos (condiciones de frontera, tasas de bombeo, etc.) permanecen constantes en el sistema. Cada periodo de stress puede ser discretizado en uno o más pasos de tiempo. La selección de paso de tiempo y construcción de la malla son pasos críticos en el diseño del modelo debido a que los valores de la discretización espacial y temporal tienen una influencia importante en los resultados numéricos (Anderson y Woessner, 1992).

En MODFLOW se pueden realizar corridas de un modelo en estado permanente y en estado transitorio. Las simulaciones en estado permanente son generalmente realizadas para obtener aproximaciones de las condiciones de equilibrio o promedias en el largo plazo. Las simulaciones en estado transitorio se realizan desde un tiempo inicial (t_0) hasta un tiempo final (t_f), a partir de una serie de pasos de tiempo. Los niveles del acuífero cambian durante el periodo de simulación dependiendo de las variaciones que se presentan en las condiciones de frontera, las perturbaciones externas, la transmisividad y las propiedades de almacenamiento del acuífero.

El código MODFLOW ha sido muy utilizado para estudiar interacciones de aguas superficiales y aguas subterráneas (Sophocleous y Perkins, 1993; Grebenyukov, 2001; Osman y Bruen, 2002; Chen y Chen, 2003,; Sultan et al., 2007), utilizando los paquetes River, Drain y Stream. En el caso especifico de la modelación de la interacción humedales – acuífero se pueden consultar los trabajos de Hunt et al., (1996, 2003, 2005 y 2006), Council, (1997), Restrepo et al., (1998), Langevin et al., (2005), Venkatesh et al., (2006), Mylopoulos et al., (2007), Boswell y Olyphant (2007), Jolly et al., (2008), Ayenew et al., (2008) y Skalbeck et al., 2009.

El Groundwater vistas (GV), es un ambiente de modelación para aguas subterráneas que acopia un sistema de diseño de modelos con herramientas de procesamiento gráfico, producida y comercializada por Environmental Simulation Inc. (Rumbaugh y Rumbaugh, 2004).

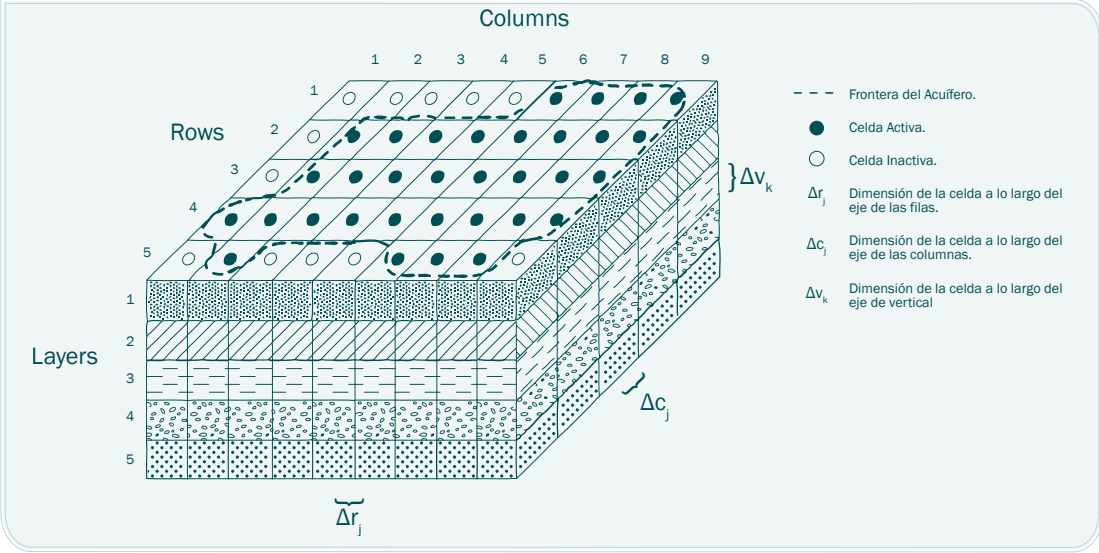


Figura 2-4 Sistema acuífero hipotético discretizado (Modificado de Harbaugh, 2005)

A continuación se documentan las principales características de los módulos empleados en la simulación hidrodinámica de las interacciones agua superficial – agua subterránea en un humedal.

2.3.1. Descripción conceptual del paquete recarga (Recharge package).

La recarga natural de los acuíferos comprende: la recarga que produce la lluvia a través del suelo, la que se produce en corrientes superficiales y la que procede de trasferencias desde otras unidades hidrogeológicas (Custodio et al., 1997). En el caso de la recarga por lluvia, la cual es la situación más común y regionalmente la más importante, es quizás uno de los procesos más difíciles de estimar. La cantidad de recarga que ingresa al acuífero por precipitación depende de variables como la evapotranspiración, la humedad del suelo y su capacidad de almacenamiento, el espesor de la zona no saturada, el tipo de suelo, la pendiente de la cuenca, y la intensidad y duración de la lluvia (McDonald y Harbaugh, 1988). Existe en la literatura diferentes métodos para estimar la recarga, por lo tanto es importante emplear modelos que estén en capacidad de representar adecuadamente los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca para determinar de forma precisa la cantidad de recarga que llega al acuífero.

El paquete de recarga en MODFLOW (rch) simula la recarga distribuida en toda el área del acuífero y se presenta como la recarga neta por unidad de área, que es aplicada en una celda. Es importante anotar que no es posible calcular la recarga neta por precipitación en MODFLOW o dentro de alguno de los módulos estándar adicionales, este es un dato de entrada para el modelo. Además, el modelo en MODFLOW no permite que ocurra simultáneamente recarga en diferentes profundidades en la columna

vertical de una celda, debido a que la recarga natural entra al sistema de aguas subterráneas por la parte superior del suelo (superficie del terreno). En caso de que sea necesario representar la recarga más de una vez en la columna vertical de una celda, el paquete pozos (WEL) puede ser utilizado para agregar agua al sistema (recarga artificial o pozos de inyección). Durante cada iteración, la tasa de recarga será sumada a la ecuación de flujo de agua subterránea.

2.3.2. Descripción conceptual del paquete River (River package)

Conceptualmente, el flujo entre ríos y acuífero en el modelo de aguas subterráneas es calculado a partir de la Ley de Darcy, asumiendo flujo uniforme sobre una sección de la corriente superficial y el correspondiente acuífero. Este flujo de transferencia es calculado con la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{KwL}{m}(h_r - h_a) \qquad \text{Ec. 2-8}$$

Donde Qt es el flujo entre el río y el acuífero (positivo para descarga del río hacia el acuífero y negativo para flujo del acuífero hacia el río), K es la conductividad hidráulica de los sedimentos del lecho, L es la longitud del tramo del río, w es el ancho del canal, m es el espesor del material del lecho del río, hr es el nivel del río y ha es la cabeza de acuífero.

La ecuación 2-8 es una aproximación aceptable de la interacción río-acuífero sobre cierto rango de valores de cabeza del acuífero. Sin embargo, en muchos casos, si los niveles de agua caen por debajo de cierto punto, el goteo del río deja de depender de la cabeza del acuífero.

2.3.3. Descripción conceptual del paquete Lake (LAK3 Package)

En el paquete Lake (LAK3- Merritt y Konikow, 2000) el lago es representado como un volumen de celdas inactivas dentro del modelo de malla, extendido desde la superficie hasta el fondo de la misma. Las celdas activas del modelo que rodean este espacio, representan el acuífero adyacente, el cual intercambia agua con el lago a una tasa que está determinada por las cabezas relativas y por la conductancia, basada en las dimensiones de las celdas de la malla, la conductividad hidráulica del material del acuífero y las especificaciones del usuario con respecto al goteo (leakance), que representa la resistencia del flujo al material del lecho del lago. El lecho del lago no requiere ser especificado como una dimensión dentro del modelo de malla.

Para la simulación de conexiones lago – corriente, este paquete se acopla con el paquete Stream Routing Package -STR- para identificar las entradas y salidas, y transmitir la información al modelo de flujo.

El estado o nivel del lago puede ser modelado en estado permanente o transitorio, en condición explícita, implícita o semi-implícita. Aunque la solución más empleada y eficiente computacionalmente es la explícita. Nair y Wilsnack (1998), encontraron que la solución implícita evita el comportamiento oscilatorio del tiempo cuando el material del acuífero que rodea el lago es altamente permeable. En las simulaciones en estado transitorio, el estado del lago es ajustado al final de cada paso de tiempo a partir

del balance de agua, el cual requiere la estimación de los siguientes componentes: recarga por precipitación, evaporación, escorrentía, entradas y salidas superficiales y salidas desde el lago por procesos antropogénicos.

Igualmente, este paquete permite la modelación de la conectividad entre lagos, característico de sistemas con batimetría irregular en la que en un paso de tiempo especifico se puede presentar el secado del lago y por ende la formación o división del sistema en dos o más cuerpos de agua, para los cuales se calcula su propio estado y balance de agua.

En la conceptualización del paquete Lake, se considera que el movimiento horizontal y vertical del agua desde el lecho del lago hacia una posición en el acuífero o viceversa, ocurre porque el sedimento del lago es permeable o porque el material del acuífero presenta un rango de permeabilidades que favorecen este intercambio.

Como los lagos y todas las fuentes de agua que los alimentan, pueden tener asociados la presencia de algunos solutos, el paquete Lake a través del modelo MOC3D (Konikow et al., 1996), permite modelar el transporte de solutos en este sistema. No obstante, este no es distribuido por el USGS como un paquete independiente y además, no se encuentra disponible en la versión comercial Groundwater Vistas empleado en este proyecto.

Las magnitudes de los términos de fuentes y sumideros en la ecuación del balance hídrico de los lagos difieren comúnmente de los correspondientes términos del balance de agua del acuífero superficial adyacente, de modo que variaciones en las condiciones hidrológicas puedan causar que tanto el lago como el acuífero afecten los niveles en otro cuerpo de agua superficial.

2.3.4. Descripción conceptual del paquete Stream (Stream Package)

El paquete Stream -STR1- (Prudic, 1989) es una modificación del paquete River para el tránsito de caudales a través de uno o más ríos, permitiendo calcular el intercambio de flujo entre las corrientes superficiales y el acuífero.

El tránsito de caudales dentro del paquete STR1 está basado en la ecuación de continuidad y la hipótesis de flujo permanente en el río (invariante en periodos discretos de tiempo), uniforme (invariante en el espacio) y densidad constante, tal que durante todo el tiempo las tasas volumétricas de caudales de entrada y salida son iguales, y ninguna cantidad de agua es agregada o removida del almacenamiento en los canales superficiales. El módulo está diseñado para transitar caudales a través de una red de drenaje (la cual puede incluir ríos, corrientes, canales y zanjas). El caudal de los ríos se presenta siempre en la misma dirección a lo largo de los canales, y es constante para cada paso de tiempo usado en el modelo de aguas subterráneas.

En el caso en que se presenten cambios importantes durante cada paso de tiempo en el almacenamiento del canal, deberían utilizarse modelos hidráulicos para flujo no permanente, los cuales han sido acoplados a MODFLOW como MODBRANCH (Swain et al., 1996) y DAFLOW (Jobson y Harbaugh, 1999). Por lo tanto, el paquete STR1 está diseñado para la modelación de cambios de largo plazo (meses a décadas) para flujo de aguas subterráneas usando caudales medios en los ríos, y no es recomendado para la modelación de intercambio de agua entre río y acuífero cuando el objetivo es analizar efectos a corto plazo (minutos a días) causados por la alta variabilidad de los caudales en los ríos (Prudic et al., 2004).

Desde el punto de vista conceptual, el paquete STR1 no es un modelo hidráulico como tal sino una rutina que realiza un balance para los flujos en uno o más ríos que interactúan con el sistema de agua subterránea. La red de drenaje definida en el modelo está dividida en tramos y segmentos. Un tramo es una sección del río asociada con una celda particular de diferencias finitas usada para simular el flujo de agua subterránea. Un segmento es un grupo de tramos que tiene características semejantes (elevación del lecho del río, espesor y conductividad hidráulica, y profundidad y ancho del río), y con los cuales se puede configurar desviaciones, ramificaciones y ríos tributarios.

El balance de agua para cada tramo del río, así como la tasa de goteo entre tramo del río y la correspondiente celda del modelo, son calculados en MODFLOW durante cada paso de tiempo. Estos cálculos son realizados independientes del balance de agua en el modelo de aguas subterráneas.

2.3.5. Descripción conceptual del paquete Wetland (Wetland Package)

El paquete Wetland fue desarrollado por el South Florida Water Management District – Water Supply Department (SFWMD) y el Centro de Hidrológica y Recursos Hídricos de la Universidad Florida Atlantic University – FAU- (Restrepo et al., 1998, Wilsnack et al., 2001).

Este paquete simula los componentes del flujo vertical y horizontal de la interacción humedal – acuífero en zonas donde el nivel freático puede estar en la superficie del terreno (Figura 2-5), teniendo en cuenta los siguientes factores naturales: cubierta vegetal, presencia de material orgánico en los sedimentos del lecho, canales preferenciales de agua, diques y barreras. Igualmente integra la opción de secado y rehumedecimiento asociado al patrón estacional del nivel de agua en el humedal. Este módulo puede ser empleado para evaluar el impacto de los usos del suelo en las entradas y salidas de agua.

En la actualidad se han realizado modificaciones al algoritmo original en cuanto a los requerimientos de información, definición de parámetros de entrada y adaptación al código SEAWAT, pero aun no están disponibles para la comunidad académica.

Los paquetes descritos hacen parte de un conjunto de métodos empleados tradicionalmente para modelar la dinámica de interacción entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales. En el caso especifico de los sistemas lénticos (lagos y humedales), también se han empleado técnicas convencionales como -Fixed stage lake, constant head, head dependent flux y High–K lake (Winter, 1976; Anderson y Munter, 1981; Lee, 1996) y las aproximaciones link-node (Walton et al., 1996).

Con el código MODFLOW se ha empleado el paquete River para generalizar la representación de un lago como una fuente o sumidero de cabeza constante en un área fija localizada en la capa superior del acuífero. La suposición implícita de este procedimiento es que el río o estado del lago no varía como resultado del goteo a través de los sedimentos del lecho o como resultado de otras presiones. Este concepto fue extendido con el desarrollo del paquete Reservoir (Fenske et al., 1996), el cual permite que el estado de un reservorio superficial varíe linealmente entre unos límites especificados

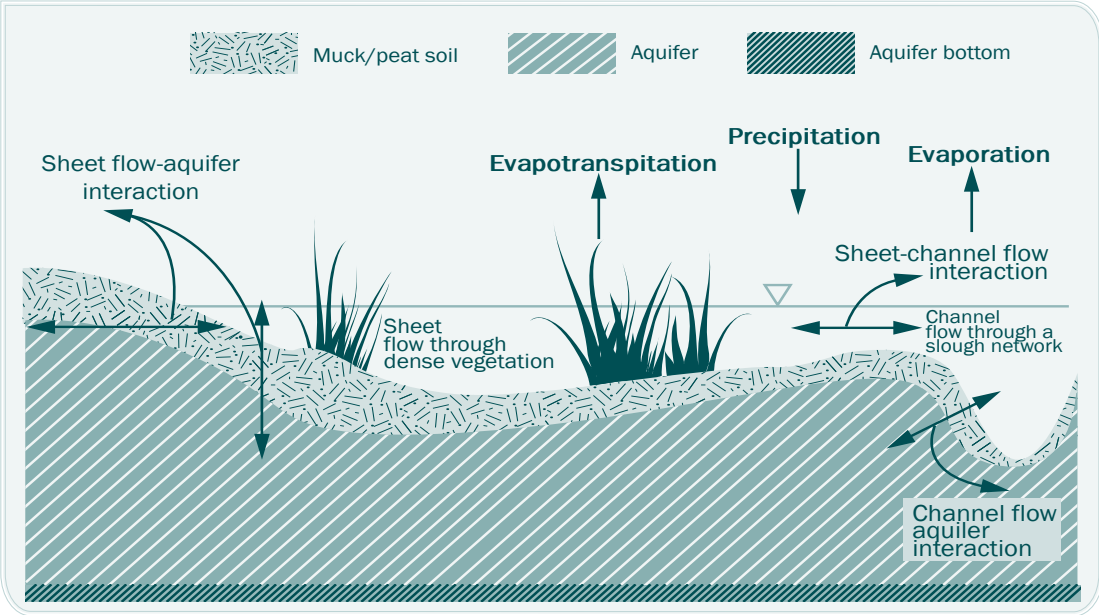


Figura 2-5 Esquema conceptual de flujos en el paquete Wetland

por el usuario durante cada periodo de estrés, permitiendo además, que su extensión cambie con base en la comparación del estado del reservorio con la elevación de la superficie, definida también por el usuario.

Ambos paquetes, River y Reservoir, asumen que los cuerpos de agua superficial se localizan por encima de la superficie de la capa del modelo de malla. Esta representación implica que el acuífero es denso comparado con la profundidad mojada del reservorio y que el promedio de la infiltración horizontal desde los sedimentos del lago y los correspondiente efectos en el sistema de flujo del acuífero que lo rodea, son despreciables o poco importantes en la simulación. Esta representación puede ser una buena aproximación en algunas aplicaciones y tiene la ventaja que no requiere que las celdas dentro del modelo de malla sean identificadas como un espacio ocupado por un lago.

Otra aproximación a la simulación de lagos que no requiere el uso de un paquete modular específico es la técnica conocida como “High K”, el humedal o lago es representado en el modelo de malla como un grupo de celdas con unas características hidráulicas específicas, asociadas a valores altos de conductividad hidráulica y a valores de coeficiente de almacenamiento cercanos a la unidad. El estado o nivel del humedal es calculado empleando las mismas ecuaciones usadas para determinar las cabezas en el acuífero. Esta técnica, acoplada con el método de aproximación al rehumedecimeinto (rewetting) fue usada con buenos resultados en la representación de humedales en acuíferos libres y en la modelación del transporte de solutos (Merritt, 1997; Lee, 1996; Swain et al., 1996), así como en la modelación usando elementos analíticos (Hunt y Krolestki, 1996; Hunt et al., 2000). Su principal dificultad es que las conexiones lago – corriente son difíciles de representar con precisión y la representación del lecho del lago requiere de un gran esfuerzo, y normalmente puede desencadenar algunos problemas de estabilidad en la solución. Generalmente, la técnica de “High K” es muy usada en problemas de aplicación simple.

Los paquetes LAK incluyen la modelación de la infiltración desde los sedimentos del lago, así como el secado de celdas con la subsecuente reducción del área

superficial y posterior rehumedecimiento. Cada una de las versiones disponibles (LAK1 – Cheng y Anderson, 1993; LAK2 – Council, 1998 y LAK3 – Merritt y Konikow, 2000), dan cuenta de las mejoras que con el paso del tiempo se han realizado. Estas hacen referencia a la inclusión del solucionador de las ecuaciones en estado permanente (LAK2, LAK3), la habilidad para modelar el transporte de solutos y su concentración (LAK3) y el acople de diferentes esquemas de solución para resolver en estado transitorio los niveles del lago y la conectividad, o no, entre los mismos (LAK3). Actualmente su uso es limitado, debido a la necesidad de gran cantidad de datos y a la complejidad en la inclusión de las características de las corrientes superficiales. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) buscando suplir estas deficiencias, ha desarrollado versiones mejoradas de los paquetes STR (Stream Package) (Prudic, 1989) para lograr la simulación integrada de las interacciones lago-corriente-acuífero, conocidos como los paquetes SFR (Streamflow Routing Package) (Prudic et al., 2004) y el SFR2 (Niswonger y Prudic, 2006); este último permite modelar las interacciones incluyendo el flujo en la zona no saturada. No obstante, a pesar del gran avance en el desarrollo de paquetes para la simulación de estas interacciones, la correcta definición de la malla (1D, 2D o 3D) y el tamaño de la celda, siguen siendo pasos cruciales en la convergencia y correcta distribución del flujo en los procesos de simulación de las interacciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas (Hunt, 2003).

3.MARCO METODOLÓGICO

Fragmento de “El Rio del Olvido” de Eduardo Galeano.

“La primera vez que fui a Galicia, mis amigos me llevaron al río del Olvido. Mis amigos me dijeron que los legionarios romanos, en los antiguos tiempos imperiales, habían querido invadir estas tierras, pero que aquí no habían pasado: paralizados por el pánico, paralizados se habían detenido a la orilla de este río. Y no lo habían atravezado nunca, porque quien cruza el río del Olvido llega a la otra orilla sin saber quién es ni de dónde viene.

Yo estaba empezando mi exilio en España, y pensé: si bastaran las aguas de un río para borrar la memoria ¿Qué pasará conmigo, resto de naufragio, que atravesé toda una mar?”

3. MARCO METODOLÓGICO

Para desarrollar un modelo conceptual y numérico del sistema hidrológico Ciénaga Colombia en el Bajo Cauca antioqueño se adelantaron una serie de tareas y actividades que en su recorrido y aplicación sistemática, permitieron lograr los objetivos propuestos. Como resultado de ello, se presenta en este capítulo un esquema metodológico general (Figura 3-1) que se constituye en un camino para abordar el conocimiento integral de los sistemas hidrológicos y en especial, aquellos en los que se identifican ecosistemas estratégicos como los humedales y donde además, las aguas subterráneas juegan un papel importante en los intercambios de flujo de agua, energía y productos biogeoquímicos.

Este esquema metodológico materializa las percepciones del grupo de trabajo que aborda cada uno de los objetivos propuestos en el marco del proyecto **"Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca"** (U de A – IAEA, 2006) del cual hicieron y hacen parte los proyectos de Santa (2009), Gómez (2010) y Palacio (en ejecución).

En los apartes siguientes se desglosa la metodología general en tres esquemas que representan los alcances del proyecto de investigación. El primero de ellos es un enfoque macro hidrológico, el cual considera todas las fases para la formulación de un modelo hidrológico conceptual de interacción agua superficial – agua subterránea (Figura 3-2); el segundo hace referencia al diseño e implementación del programa de monitoreo y el análisis de los datos (Figura 3-3) y, el tercero, a los procesos de modelación numérica de flujo y transporte de solutos para obtener un modelo de simulación que permita evaluar la respuesta del sistema cuando es sometido a presiones naturales o antrópicas (Figura 3-4).

En la sección 3.2, se documenta los materiales y métodos empleados en cada una de las etapas que conforman la metodológica general.

3.1. Esquema metodológico general

La información existente y disponible permite construir, adoptar o ajustar el modelo hidrológico conceptual del sistema, del cual serán estudiados algunos o todos sus componentes en función de los objetivos y alcances del proyecto, planteados inicialmente como respuesta a un problema específico de investigación.

En este proyecto de investigación, se abordó la identificación de las interacciones entre los compartimentos léntico y subterráneo, en el que un humedal en particular se constituye en el principal ecosistema, dada las características ambientales y los productos hidrobiológicos que le provee a las comunidades asentadas a su alrededor.

El modelo hidrológico conceptual (MHC), integrará la información de las características y propiedades de los sistemas superficial, atmosférico y subterráneo; entendiendo al compartimiento atmosférico como aquel desde el cual se da la principal entrada al sistema. La información base para su construcción (o ajuste, en el caso de contar con un modelo conceptual ya establecido para la zona de estudio) lo constituirá la información documental –general, cartográfica e hidrometeorológica– consolidada y administrada por los centros de información ambiental de las Autoridades Ambientales, ONG y Administraciones municipales, así como de cada uno de los estudios que se hayan adelantado en la zona por parte de grupos académicos, corporaciones ambientales o entidades privadas. No obstante, cuando la información disponible no es suficiente para interpretar el sistema en términos de escala espacial y temporal, cuando se identifican nuevos requerimientos de información; la construcción e implementación de un programa de monitoreo de variables: hidráulicas, fisicoquímicas, hidrometeorológicas o isotópicas, es una etapa importante, en la que la extensión y condiciones de acceso a la zona de estudio, la escala de trabajo, la disponibilidad de recursos financieros para su operación en el tiempo, y los requerimientos de información orientados al cumplimiento de los alcances del proyecto, juegan un papel importante en su diseño e implementación.

Siguiendo el proceso metodológico anterior será posible contar con un MHC menos incierto, que puede ser sometido a nuevas preguntas de investigación, que podrán ser abordadas con la formulación de nuevos proyectos o mediante ejercicios de simulación de escenarios que orienten la toma de decisiones o la definición de lineamientos para la sostenibilidad ambiental del sistema.

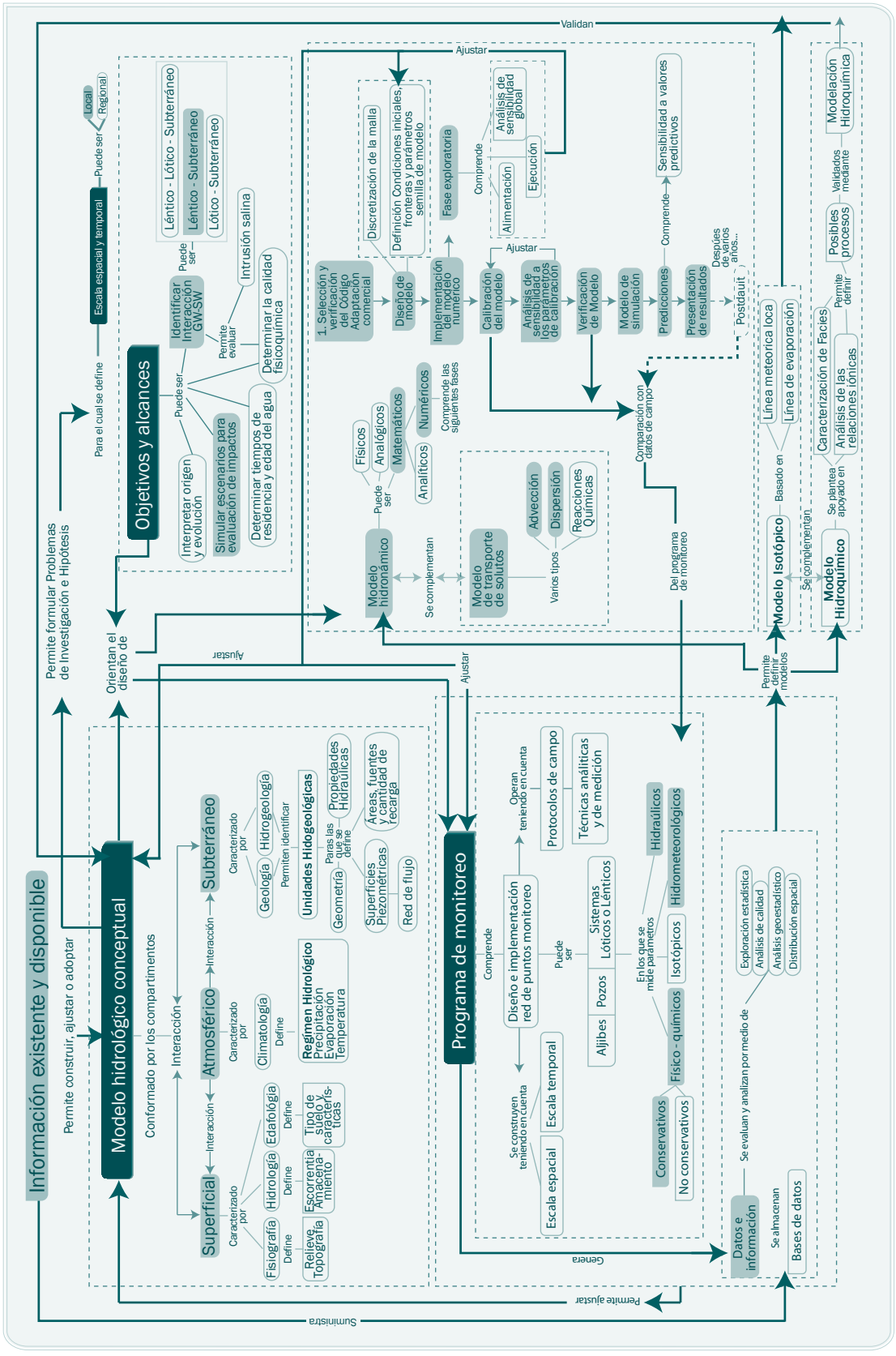


Figura 3-1 Esquema metodológico general para la construcción de un modelo conceptual y numérico de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas (Adaptado de Santa, 2009)

3.1.1. Formulación metodológica del modelo hidrológico conceptual

Un modelo conceptual de un sistema hidrológico, en general, puede integrar información acerca de las características de los sistemas superficial, atmosférico y subterráneo; evaluar las condiciones de precipitación, evapotranspiración y caudal; describir la geometría (espesores y extensión), propiedades hidráulicas (porosidad, conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento), posiciones de las superficies freáticas y direcciones del flujo para el sistema acuífero; además, relacionar información climatológica, edafológica, geológica y fisiográfica de la zona de estudio para definir zonas, procesos y cantidad de recarga; evaluar las reservas de agua e identificar posibles interacciones entre sus componentes.

Para la construcción, ajuste o adopción de un modelo hidrológico conceptual (Figura 3-2) es indispensable partir de la recopilación, revisión y evaluación de la información existente y disponible y, de un primer reconocimiento en campo; mediante el cual se obtiene a partir de la observación directa de la zona de estudio, una idea global del sistema a representar. Igualmente, es posible a partir del procesamiento y análisis de esta información definir una primera escala espacial y temporal del modelo, y adoptar algunas inferencias físicas e hidrológicas, que serán refinadas una vez se identifiquen los requerimientos de nuevos datos e información; que serán obtenidos mediante el programa de monitoreo de variables hidráulicas e hidrometeorológicas.

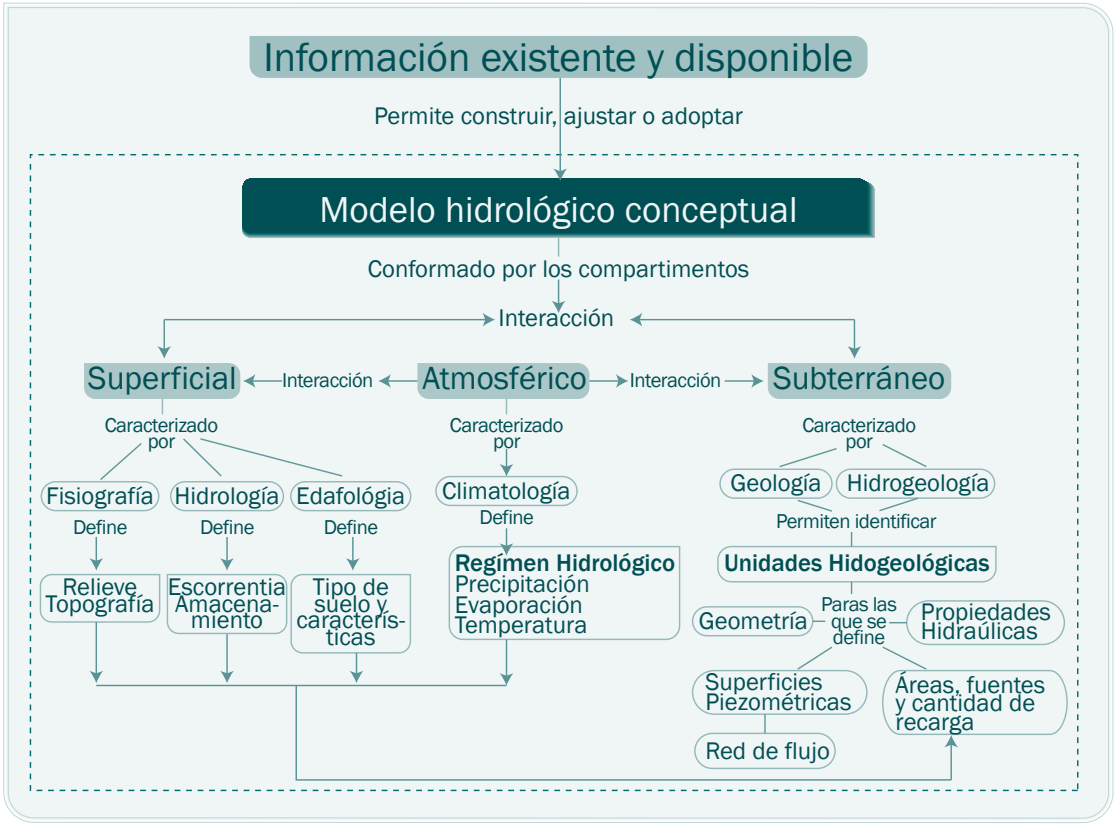


Figura 3-2 Formulación metodológica del modelo hidrológico conceptual de interacción

Para la caracterización del medio físico se requiere como mínimo de la siguiente información general y específica (Tabla 3-1).

Tipo de información	Representado en	Para caracterizar de la zona de estudio
Cartografía básica, imágenes de satélite y/o fotografías aéreas.	Curvas de nivel, red de drenaje, vías, divisiones político - administrativas, localización de centros poblados, Modelos digitales de terreno	Fisiografía, hidrografía, condiciones de acceso
Cartografía temática	Geología, Geomorfología, usos del suelo, cobertura vegetal, delimitación de cuerpos lénticos, divisoria de cuencas superficiales y subterráneas, unidades hidrogeológicas	Edafología: tipo y característica de los suelos, identificación de zonas potenciales de recarga, características de las unidades hidrogeológicas
Información hidrometeorológica e hidráulica	Series históricas de precipitación, caudal, temperatura, evaporación, humedad, radiación solar, variaciones de nivel de agua en los cuerpos superficiales	Caracterizaron climatológica y régimen hidrológico
Información hidrogeológica	Inventario e información estratigráfica de los puntos de agua, pruebas de bombeo, sondeos eléctricos, nivelaciones de agua en condiciones estáticas y dinámicas, caracterizaciones de calidad del recurso.	Características del medio subterráneo: propiedades hidráulicas, superficies piezométricas – líneas de flujo- espesores y geometría de las unidades hidrogeológicas.

Tabla 3-1 Información mínima requerida para la caracterización del medio físico

La información anterior es sometida a procesos de análisis de calidad y estadístico, correlación y modelación espacial mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas; con las cuales es posible obtener modelos digitales de terreno que representen la distribución continua de variables como: la precipitación, la evapotranspiración, las cabezas piezométricas, la geometría y propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (conductividad hidráulica, trasmisividad y coeficiente de almacenamiento), la calidad de agua y, cuando se considera pertinente la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del sistema hidrogeológico.

Los modelos digitales construidos y la información analógica y digital disponible, es interpretada para la zona de estudio en forma de mapas, secciones transversales, cortes y perfiles que finalmente permiten conceptualizar y representar el sistema en esquemas o diagramas donde se indican las direcciones y magnitudes de los procesos que se dan entre sus compartimentos.

3.1.2 Formulación metodológica del programa de monitoreo de variables hidráulicas, hidrometeorológicas y fisicoquímicas

Los programas de monitoreo tienen como objetivo cuantificar y hacer seguimiento a la variación espacio temporal de uno o varios parámetros a través de la operación continúa y la aplicación de métodos estandarizados en un número específico de estaciones, las cuales deben estar distribuidas en la región de forma tal, que permitan reflejar perfectamente la dinámica del fenómeno estudiado. Cuando se piensa en sistemas hidrológicos y sus variables asociadas, las redes deben ser diseñadas teniendo en cuenta los siguientes aspectos básicos:

- Los objetivos de la red de monitoreo.
- La representatividad espacial de los puntos de monitoreo.
- La frecuencia de las observaciones.
- El tipo y número de variables a monitorear.
- Costos de implementación vs. recursos financieros disponibles.

Bajo estas condiciones, es indispensable conocer para la zona de estudio **el mode lo hidrológico conceptual** que permita identificar de acuerdo con los **objetivos del proyecto** el tipo y numero de variables a medir. En el caso de los sistemas superficiales y subterráneos estas pueden ser de tipo **hidráulico** -caudales, niveles de agua y parámetros hidrogeológicos-; **hidrometeorológico** -precipitación, evapotranspiración, temperatura, humedad, radiación solar-; **fisicoquímicas** -parámetros de calidad conservativos o no conservativos- e **isotópicas**. Cada una con sus protocolos específicos de campo, para la toma y preservación de las muestras y de laboratorio, para el análisis y determinación de las mismas (Figura 3-3). En general se recomienda adoptar los protocolos de toma de datos y muestras propuestos por instituciones reconocidas, en el caso Colombiano, los desarrollados por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS, 2002) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), (Vargas, 2004). Para los análisis químicos, los métodos analíticos estandarizados del Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Los puntos de monitoreo pueden ser aljibes, pozos y fuentes superficiales (corrientes, ciénagas, lagunas o lagos); los cuales deben estar georreferenciados y nivelados, además de cumplir con ciertas disposiciones estructurales y sanitarias para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos.

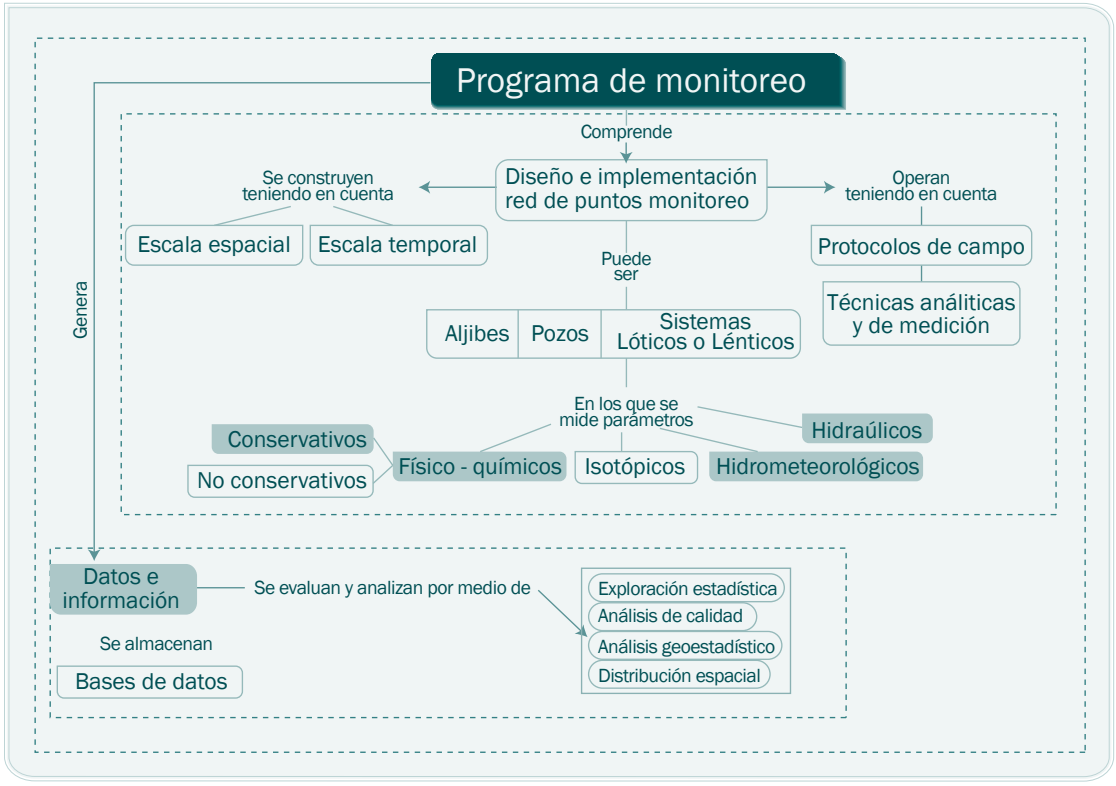


Figura 3-3 Formulación metodológica del programa de monitoreo

Los acuíferos pueden estar ubicados en diversos ambientes geológicos, como en medios granulares, en rocas fracturadas, en rocas metamórficas, en terrenos kársticos, en zonas montañosas y en zonas costeras; y su extensión, nivel de explotación y uso del agua puede variar significativamente en cada caso. Por ello, para cada acuífero se requiere generar un modelo conceptual que sirva de base para la definición de la red de monitoreo considerando, principalmente: i) las zonas de recarga y descarga; ii) la dirección y sistema de flujo predominante; iii) el tipo de acuífero; iv) su condición de explotación; v) la profundidad del nivel estático; vi) la profundidad y características de la zonas saturadas y acuitardos y, vii) los fenómenos locales o regionales que pueden modificar los niveles como la distribución espacial de la precipitación, los cuerpos de agua superficial, las fallas geológicas y la variación topográfica.

Las técnicas clásicas de proyección de redes de monitoreo y análisis de datos de aguas superficiales y subterráneas se han basado en la aplicación, más o menos generalizada, de la interpolación espacial mediante métodos geoestadísticos, tipo kriging, para resolver rigurosamente los problemas básicos del diseño, optimización espacial y frecuencial de la red de monitoreo; con el fin de garantizar su operación al menor costo, la disminución de la incertidumbre y la máxima representatividad de los fenómenos explorados. Estas técnicas aplicadas desde la etapa de diseño de los programas de monitoreo, facilitan la construcción o ajuste del modelo conceptual del sistema hidrológico, permiten identificar los factores naturales o inducidos artificialmente (incluidos los de construcción y operación de cada estación de monitoreo que pueden controlar el régimen hidrodinámico de los sistemas acuíferos o superficiales, así como los que rigen el proceso de adquisición de la composición química y la calidad de las aguas), regionalizar adecuadamente los sistemas, y precisar las relaciones estímulo-respuesta en el régimen y la hidrodinámica de cada estación de monitoreo (Molerio y Torres, 2002).

La medición de niveles estáticos se lleva a cabo a través de piezómetros, pozos de producción, pozos abandonados u otro punto de captación. Una red integrada exclusivamente por piezómetros representa una alta inversión económica por ello, en la mayoría de los casos se aprovechan los puntos de agua existentes, con la ventaja de que permiten al mismo tiempo extraer agua, verificar su calidad, y determinar el nivel estático a una escala regional con una precisión razonable para fines prácticos. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de los acuíferos y la variedad en la construcción de los pozos, los niveles estáticos determinados podrían están influenciados por: i) la longitud de los filtros ranurados y su profundidad total, ii) la superficie topográfica, y iii) la presencia de uno o más acuíferos. De allí, que los datos de obtenidos requieran un análisis previo para seleccionar solo aquellos que representan la zona de estudio, en especial en casos como: conexión hidráulica entre acuíferos de diferente profundidad, estudios de caracterización de contaminación y/o evaluación de intrusión salina.

La selección definitiva de los puntos que conformarán la red, estará condicionada por aquellos sitios que cumplen con el mayor número de condiciones favorables para constituir un punto de medición permanente, como las condiciones de acceso, corte litológico, características constructivas y elevación del terreno, buscando garantizar su operación en el tiempo. Para los sitios con una alta heterogeneidad se diseñan redes de mayor densidad y cobertura, comparada con aquellos que presentan una condición homogénea, considerando además la presencia de posibles conos de abatimiento asociados a la explotación intensiva del recurso.

La frecuencia de los monitoreos, y en especial los piezométricos, se realiza generalmente en dos periodos, lluvia y estiaje, considerando los efectos de la precipitación

en la recarga de los acuíferos y la influencia de los regímenes hidrológicos en la disminución de la escorrentía, los niveles y la calidad del agua. El periodo de medición puede variar en escala temporal, y pueden ser de años, semestres, meses, semanas o incluso días, dependiendo de los objetivos y alcances del proyecto, la disponibilidad de recursos financieros o la posibilidad de acceder a estaciones de monitoreo automáticas que funcionen en tiempo real. No obstante, debido al número de puntos a monitorear y su dispersión geográfica, la continuidad de los programas de monitoreo presenta limitaciones debido principalmente a la falta de fondos para financiar su continua operación, por ello, la opción de incorporar en la operación de las redes de monitoreo a los usuarios del recurso –la comunidad– es una excelente oportunidad para lograr su continuidad y para educar en pro de la sostenibilidad de estos sistemas.

La ubicación de los puntos y los datos de campo se recomienda sean almacenados en bases de datos espaciales, soportadas en Sistemas de Información Geográfica, para su fácil consulta, actualización, procesamiento, análisis, visualización y espacialización en mapas temáticos o modelos digitales de terreno.

3.1.3. Formulación metodológica del modelo hidrodinámico y de transporte de solutos

Los modelos hidrodinámicos pueden ser de tipo físico, analógicos o matemáticos. Los modelos físicos son conocidos como los modelos de tanques de arena de laboratorio, en los cuales se miden las condiciones de flujo directamente. Los analógicos, buscan la representación del fenómeno estudiado mediante la aplicación de modelos ya validados, y los matemáticos, emplean las ecuaciones que gobiernan o representan los procesos físicos que ocurren en el sistema, para simular el flujo indirectamente. Los modelos matemáticos pueden ser resueltos analítica o numéricamente.

La modelación numérica constituye un método de modelación que ha ampliado notablemente la panorámica del estudio de las interacciones entre los sistemas superficiales y subterráneos, puesto que además de proporcionar enfoques cuantitativos, permite con frecuencia ajustar y validar los modelos conceptuales y buscar, cuando hace falta, alternativas para nuevas interpretaciones y evaluaciones.

En la escuela de la modelación numérica, existen dos concepciones principales, de un lado se habla de modelos numéricos exploratorios y por otra parte de modelos numéricos de simulación. La primera línea de pensamiento considera que es posible, e incluso adecuado, iniciar el proceso de modelación matemático-numérica paralelo al proceso de construcción del modelo conceptual del sistema, constituyéndose en el producto final del proceso; por el contrario quienes consideran los modelos básicamente como una herramienta de simulación, opinan que para poder implementar el modelo numérico es indispensable tener un conocimiento integral del sistema a estudiar donde se tenga clara la complejidad y variabilidad de cada uno de los procesos que se dan entre sus compartimentos.

En la formulación metodológica que se presenta a continuación (Figura 3-4), es adoptada de la línea de pensamiento que considera el ejercicio de la modelación numérica exploratoria como una actividad previa, que permite no solo el ajuste del modelo hidrológico conceptual sino también el refinamiento del programa de monitoreo en tanto permite identificar zonas con vacíos de información o la ocurrencia de fenómenos que no fueron considerados inicialmente y que por lo tanto deben ser caracterizados. Adicionalmente, al ser una actividad previa a la consecución de un modelo

de simulación, permite refinar el diseño del modelo numérico al alertar acerca de la necesidad de refinar la malla de nodos o ajustar las condiciones iniciales y de frontera, a fin de reproducir las condiciones hidrodinámicas propias del sistema.

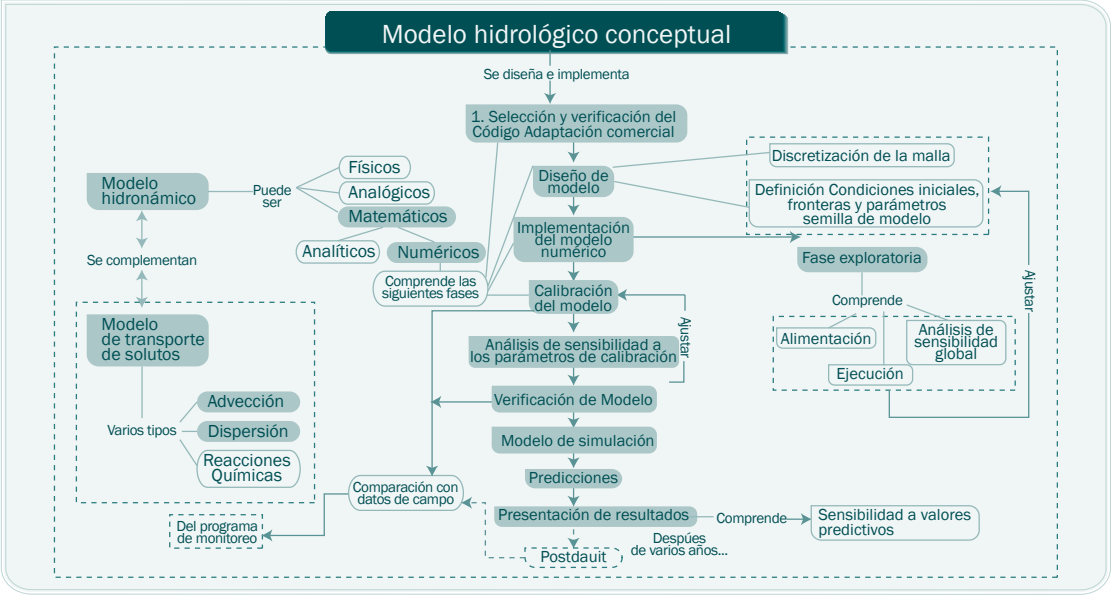


Figura 3-4 Formulación metodológica del modelo hidrodinámico y de transporte de solutos

Cuando se ha determinado que un modelo numérico es útil o necesario y se ha definido el propósito de la modelación, se inicia el proceso general de implementación que incluye de acuerdo con los protocolos generales de modelación la construcción del modelo hidrológico conceptual y su representación matemática; la selección y verificación del código de modelación; el diseño del modelo -construcción de la malla, selección del paso de tiempo, condiciones iniciales y de frontera y valores semilla para ciertos parámetros-; calibración del modelo; análisis de sensibilidad, la validación y aplicación del mismo.

Los modelos de flujo buscan dar solución al problema de la distribución de las cabezas hidráulicas y piezométricas en el sistema, y los de transporte, resolver los cambios en la concentración de un soluto cuando es afectado por procesos de advección, dispersión y/o reacciones químicas. El modelo de flujo siempre será la base para emprender luego la modelación del transporte de solutos. A continuación se detallan cada una las actividades metodológicas que integran el proceso de construcción de un modelo numérico de flujo y trasporte, para un sistema en particular.

Etapas de modelación:

1. **Establecer el propósito del modelo:** Esta etapa determinará que ecuación matemática será empleada para resolver el fenómeno que aborda el problema de investigación.
2. **Interpretar el modelo conceptual del sistema:** Para cada uno de los compartimentos del sistema hidrológico se debe interpretar las condiciones iniciales y de frontera. En este punto, la visita de reconocimiento a la zona de estudio ayuda a construir la realidad del sistema y a controlar la toma de decisiones e inferencias que deban realizarse durante los procesos de modelación. Igualmente, los datos de campo son analizados y acoplados para definir las propiedades, parámetros hidráulicos y periodos de estrés hidrológico.

3. **Selección y verificación del código de computación.** El código es el programa que contiene los algoritmos matemáticos para resolver el modelo numérico. Ambos deben ser verificados con el objetivo de demostrar que se describen los procesos físicos que ocurre en el medio estudiado.
4. **Diseño del modelo.** Este paso incluye el diseño de la malla, selección del paso de tiempo, condiciones iniciales y de frontera, selección preliminar de los valores semilla para los parámetros del sistema y definición del periodo de estrés hidrológico.
5. **Implementación y ejecución del modelo numérico:** En este punto se habla de modelación tipo exploratoria que busca mediante las primeras corridas y análisis de sensibilidad global de los resultados, detectar la necesidad de refinar condiciones iniciales, de frontera y parámetros semilla del modelo, o incluso el modelo conceptual del sistema hidrológico. El tiempo de ejecución del modelo depende de varios elementos, entre los cuales los más importantes son la eficiencia del compilador que se use, la velocidad a la que el computador ejecute el programa, el tamaño del modelo y la velocidad de los dispositivos de salida.
6. **Análisis de sensibilidad a los parámetros de calibración:** La calibración del modelo es influenciado por la incertidumbre propia de la distribución espacio – temporal de los parámetros establecidos para el dominio del problema y de la definición de las condiciones de frontera y periodos de estrés hidrológico. Los análisis de sensibilidad se desarrollan para establecer la incertidumbre en la calibración del modelo.
7. **Calibración:** Su propósito es lograr que el modelo pueda reproducir los cabezas y los flujos medidos en campo en un rango de error aceptable. Se constituye en una etapa que busca ajustar los parámetros del modelo mediante la aplicación del problema inverso, para el cual existen dos técnicas: ajuste manual por ensayo y error y/o estimación automática de parámetros mediante códigos específicos de computador acoplados a los paquetes de modelación. La calibración se inicia en estado permanente, donde se busca reproducir las condiciones promedio representativas del área de estudio, y cuando esto se logra, se realiza para la condición transitoria, previo cumplimiento de las demás fases de modelación.
8. **Validación del modelo:** Su propósito es establecer el grado de confianza en el modelo desarrollado al reproducir un segundo conjunto de datos de campo. Si el modelo es aceptado, en este punto puede hablarse de un modelo de simulación.
9. **Predicción:** Constituye la respuesta del sistema sometido a ejercicios de simulación de escenarios hipotéticos o posibles, con el propósito de conocer las respuestas del mismo a presiones de tipo natural o antrópico.
10. **Sensibilidad a valores predictivos:** Esta etapa busca cuantificar los efectos y la incertidumbre de los resultados en la predicción.
11. **Presentación de resultados:** Una clara presentación del diseño y los resultados del modelo es esencial para una efectiva representación del modelo numérico.
12. **Validación futura o postaudit:** Se realiza después de muchos años de corridas del modelo. En esta etapa es indispensable que continúe operando el programa de monitoreo, ya que nuevos datos de campo son necesarios para evaluar si las predicciones son correctas. Si los resultados son adecuados, puede decirse que el modelo esta calibrado para el sitio en particular.
13. **Rediseño del modelo**: La validación futura dirigirá nuevos dimensionamientos con respecto al comportamiento del sistema, que incluso pueden sugerir cambios en el modelo conceptual o en los parámetros del modelo numérico.

Aunque pocos estudios de modelación siguen todos los pasos del protocolo, este representa el ideal con el cual podría ser medido minuciosamente la aplicación de la modelación numérica en el estudio de los sistemas hidrológicos.

3.2. Materiales y métodos

Los datos disponibles, la información que de ellos pueda extraerse y las herramientas para su manipulación, representan los materiales que se emplean para llevar a cabo un procedimiento de análisis que permita dar cumplimiento a los objetivos planteados en el marco de un proyecto de investigación.

A continuación se detalla los materiales y métodos empleados en la aplicación de la metodología general al caso de estudio de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

3.2.1. El modelo hidrológico conceptual

Como se mencionó en el numeral 3.1.1, un modelo hidrológico conceptual puede ser construido a partir de la información existente; representada básicamente en información de tipo general, cartográfica e hidrometeorológica que permite caracterizar el sistema con respecto a sus condiciones fisiográficas, hidrográficas, climatológicas, geológicas y edafológicas. No obstante, también puede ser adoptado en el caso de contar con un modelo conceptual validado para la zona de estudio, o ajustado si se identifica a partir del análisis de nueva información condiciones que obliguen a ello.

3.2.1.1. Información disponible

Para la construcción del modelo hidrológico conceptual de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia se empleó la información que se relaciona en la tabla 3-2.

Tipo de información	Descripción	Fuente
Cartografía básica	• Curvas de nivel. • Drenajes dobles y sencillos. • Complejos de humedales • Vías y caminos • Divisiones político-administrativas. • Centros poblados Planchas 82-IV-A, 82-IV-B, 82-IV-C, 82-IV-D, 93-II-A, 93-II-B, 93-II-C, 93-I-B Y 93-I-D escala 1:25.000	IGAC (1974 y 1979). Convertida en formato digital por Corantioquia (2000)
Cartografía temática	Modelo hidrogeológico regional del Bajo Cauca antioqueño (Validado). Mapa de suelos del departamento de Antioquia escala 1:400.000 Mapa Geomorfológico del departamento de Antioquia escala 1:100.000	• Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: El Bajo Cauca antioqueño. (Betancur, 2008). • Validación del modelo conceptual de acuíferos en la territorial Panzenú (UdeA – Corantioquia, 2006). • Evaluación hidrogeológica entre los municipios de Caucasia y Cáceres (UdeA – Corantioquia, 2003). • Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos al Norte del municipio de Caucasia (UdeA – Corantioquia, 2004). • Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos en la cuenca del Río Cacerí. (UdeA - Corantioquia, 2005). • Estudio de suelos del departamento de Antioquia. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (IGAC, 1979). • Memorias del mapa geomorfológico de amenazas y áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000. (Unal – Corantioquia, 2002).

Tipo de información	Descripción	Fuente
Información general del área de estudio	Caracterización ambiental de los humedales del Bajo Cauca antioqueño – Calidad del agua, flora, fauna, condiciones económicas, sociales y culturales.	Plan de manejo ambiental del humedal Ciénaga Colombia en el municipio de Caucasia (Corporación Montañitas – Corantioquia, 2004). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Man. (Corantioquia, 2003). Visión Panzenú (Neotrópicos – Corantioquia, 2001).
Modelos digitales de elevación	Modelo digital de elevación escala 1:10.000 Modelo digital de elevación Radar 30x30m	Aplicación metodológica para obtener Modelos Digitales de Elevación – MDE- en zonas de humedales. (Quintero, Montoya y Betancur, 2009). Caracterización de la cuenca del humedal Ciénaga Colombia a partir de información secundaria y utilizando herramientas geoinformáticas (Quintero, 2008).
Fotografías aéreas e imágenes de satélite	Landsat 954 de 1994 y una subescena Spot 2000	Suministrada por Corantioquia (2008) con fines académicos.
Información Hidrometeo-rológica	Series históricas de 27 estaciones hidrometeorológicas: 19 PM, 5 CO y 3 LM del IDEAM.	Suministrada por Corantioquia (2008) con fines académicos y de investigación.

PM: Pluviométrica, CO: Climatológica Ordinaria y LM: Limnimétrica

Tabla 3-2 Información disponible para la construcción del modelo hidrológico conceptual de la zona de captura de Ciénaga Colombia

3.2.1.2. Herramientas para el procesamiento de la información

La preparación, evaluación y procesamiento de la información cartográfica digital disponible, y el análisis espacial realizado para la construcción del modelo hidrológico conceptual se realizó mediante la herramienta ArcGIS Desktop, en sus módulos de ArcMap y ArcCatalog. Este software permite descubrir patrones, relaciones y tendencias de datos de manera espacial; provee la facilidad del manejo e integración para realizar análisis avanzados, modelamiento y automatización de los procesos operacionales y muestra los resultados en mapas de gran calidad (ESRI, 2008). Dado que el ArcGIS es un software que debe ser operado con la respectiva licencia, se utilizó el paquete ArcGIS – ArcView 9.2 con las siguientes extensiones: 3D Analyst, Spatial Analyst y Geostatistical Analyst, disponibles en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

Por lo general, cuando se van a adelantar estudios locales, la cartografía básica disponible (normalmente a escala 1:25.000), suele no obedecer a las necesidades requeridas para representar de forma adecuada, la dinámica hídrica que caracteriza las interacciones entre corrientes de agua, acuíferos y cuerpos lénticos en zonas planas, particularmente, en aquellas donde existen humedales asociados a antiguas llanuras de inundación de ríos.

En el curso del proyecto **"Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño"** que se adelantó en convenio con el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), se tuvo como caso de estudio la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en un

área de 84 Km^2; que requiere precisamente de una caracterización fisiográfica a escala local, que permita a su vez la construcción de las superficies piezométricas y demás modelos digitales para la conceptualización del medio físico.

Para lograr un modelo digital de elevación con esta resolución espacial, Quintero (2008), aplicó una metodología de análisis que fue refinada por Quintero et al. (2009). Con la cartografía básica disponible y una serie de datos "construidos" a partir de la aplicación de criterios geomorfológicos (Betancur, 1996; Harmar y Clifford, 2007) y utilizando las herramientas de modelación espacial acopladas a los SIG, se pudo obtener un modelo digital de elevación (MDE) con mejor sentido fisiográfico, y concordante con la dinámica de flujo del sistema hidrológico. Para este propósito se exploraron diferentes métodos de interpolación espacial, entre las que se destacan las geoestadísticas tipo Kriging y las empleadas tradicionalmente para la interpolación de variables distribuidas en el espacio como: Triangulated Irregular Network (TIN), Inverse Distance Weighted (IDW), Spline, y Topo to Raster.

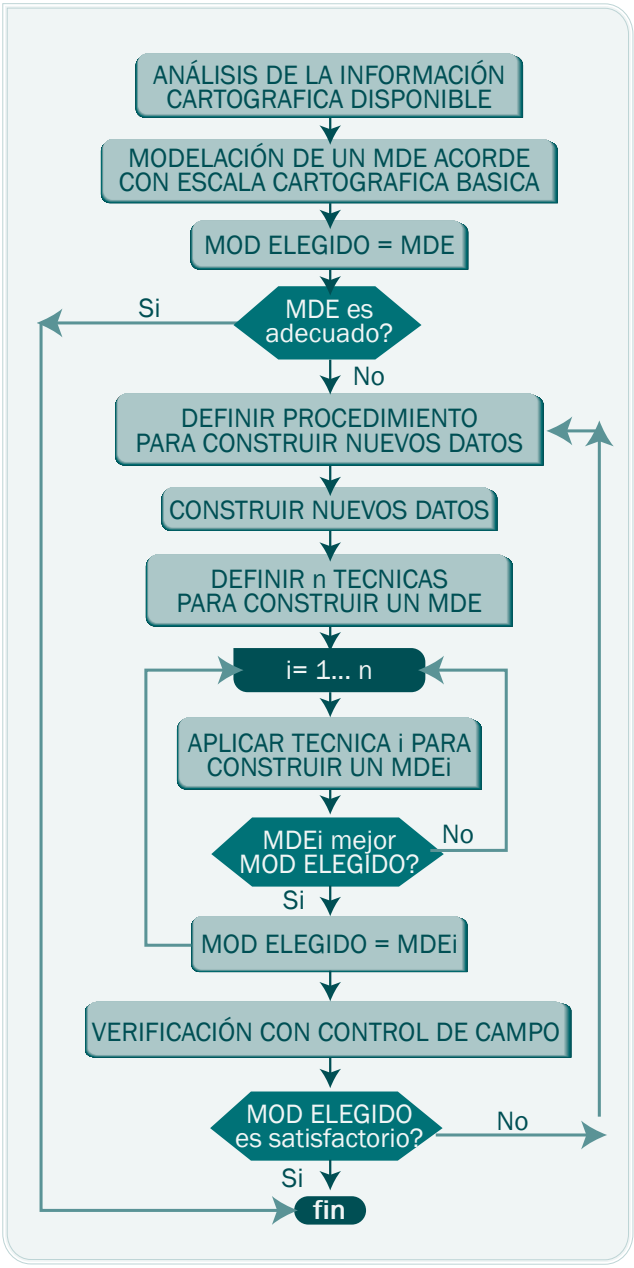


Figura 3-5 Diagrama metodológico para la construcción de un MDE mejorado.

La metodología adaptada para mejorar la calidad de un MDE (Figura 3-5), es aplicable a zonas con relieve suave o plano, de las que se tenga cartografía básica a escala 1:25.000 con una buena representación de la red de flujo, pero en las cuales los métodos estándar de interpolación espacial no permiten obtener representaciones adecuadas de la fisiografía y condiciones de flujo de agua acordes con la lógica de los sistemas hidrológicos, razón por la cual se hace necesario recurrir a procedimientos alternativos para la construcción de nuevos datos que permitan el desarrollo de un MDE adecuado para los propósitos de los proyectos.

Frente a la realidad cotidiana de no contar con recursos financieros para la obtención de nuevos datos a partir de fotografías aéreas, imágenes de satélite, utilización de GPS de alta precisión y levantamientos topográficos de detalle, se recurre a la aplicación de criterios geomorfológicos, con los cuales es posible a partir del conocimiento de la zona de estudio inferir condiciones de pendiente para los causes principales.

La metodología parte de la evaluación del MDE inicial desarrollado a partir de la cartográfica básica disponible; si este modelo no es adecuado se establece la necesidad de uno mejor y para lograrlo se definen los criterios para "construir" nuevos datos en nuevos puntos de control. Posteriormente,

se realizan los ejercicios de modelación espacial utilizando los métodos de interpolación disponibles en el software para SIG. Mediante sucesivas comparaciones entre los resultados y apoyados en el control de campo y en el conocimiento del modelador acerca de la zona de estudio, se define cual es el modelo elegido; siendo éste el que mejor representa la fisiografía del dominio.

Los detalles de esta metodología y su aplicación en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, pueden ser consultados en Quintero et al (2009).

El modelo hidrogeológico presentado en la tesis doctoral "Una aproximación al entendimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: El Bajo Cauca antioqueño" de Betancur (2008), fue la base para ajustar a la escala del proyecto, el modelo hidrogeológico del acuífero libre en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia. A partir de este modelo hidrogeológico conceptual, fue posible obtener la geometría: espesores y extensión; propiedades hidráulicas: conductividad hidráulica horizontal y vertical; coeficientes de almacenamiento y distribución y magnitud de la recarga para la zona de estudio. Este proyecto condensó, analizó e interpretó toda la información producto de los ejercicios de exploración hidrogeológica que desde el 2003 realizó la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA en el Bajo Cauca antioqueño.

Un primer acercamiento a las posibles interacciones entre los compartimentos superficial y subterráneo y el ajuste del programa de monitoreo para la nivelación piezométrica, se obtuvo al interpretar las superficies piezométricas promedio en la zona de influencia del proyecto.

3.2.2. Diseño e implementación del programa de monitoreo de variables hidráulicas, hidrometeorológicas y fisicoquímicas

Cuando se piensa en el diseño e implementación de un programa de monitoreo representativo para los objetivos y alcances de un proyecto a escala local 1:10.000, es importante tener en cuenta en la definición de la red de puntos de monitoreo, las zonas en las que se presentarán vacíos de información producto de la discontinuidad y no homogeneidad en la distribución de los puntos de agua existentes. Por lo anterior, en el marco de este proyecto fue necesaria la construcción de seis (6) piezómetros de observación con profundidades entre 6 y 12 metros. En la tabla 3-3 se describen sus perfiles estratigráficos.

Código Piezómetro	Coordenadas	Diseño	Descripción estratigráfica
GWP_03 Aduana 12 m	869572, 1371442	0.0 - 6.0 m Tub ciega Æ =3" 6.0 - 12.0 m Filtro PVC Æ =3"	0.0 – 0.05 m Delgada cubierta vegetal 0.05 – 0.50 m Arcilla terrosa color café 0.50 – 3.5 m Arcilla gris con moteado a blanco, maleable con algo de arenas finas 3.5 – 4.0 m Arcilla gris algo compacta 4.0 – 5.0 m Arena fina con granulometría 0.25 – 0.125 mm 5.0 – 5.3 m Arcilla gris con moteado a blanco 5.3 – 9.0 m Arcilla café plástica y maleable 9.0 – 12.5 m Arcilla café
GWP_0 4 Aduana 6 m	869570, 1371440	0.0 - 2.5 m Tub ciega Æ =3" 2.5 - 6.0 m Filtro PVC Æ =3"	Similar al anterior solo que de 5 – 6 m arena fina

Código Piezómetro	Coordenadas	Diseño	Descripción estratigráfica
GWP_02 Norte Ciénaga	871010, 1372062	0.0 - 2.5 m Tub ciega Æ =3”	0.0 – 0.15 m Delgada cubierta vegetal 0.15 – 0.5 m Arcilla café 0.5 – 4.5 m Arcilla gris intercalada con arcilla café 4.5 – 6.5 m intercalaciones de arcilla gris y café con algo de arena muy fina con granulometría inferior a 0.25 – 0.125 mm
	H = 61 m Pcs = 8m	2.5 - 6.0 m Filtro PVC Æ =3”	
GWP_06 Piez. Jalisco	866279, 1370704	0.0 - 3.0 m Tub ciega Æ =3”	0.0 – 0.04 m Delgada cubierta vegetal 0.04 – 0.50 m Arcilla terrosa color café 0.50 – 3.0 m Arcilla gris 3.0 – 9.5 m Arcilla café con algo de arenas finas 9.5 – 10.5 m Arena fina con granulometría 0.25 – 0.125 mm 10.5 – 12.5 m Arcilla arenosa
	H = 70 m Pcs = 6m	3.0 – 12.0 m Filtro PVC Æ =3”	
GWP_01 Piez. Candelaria	867919, 1372658	0.0 - 3.0 m Tub ciega Æ =3”	0.0 – 0.05 m Delgada cubierta vegetal 0.05 – 0.60 m Arcilla terrosa color café 0.60 – 5.8 m Arcilla gris plástica y maleable 5.8 – 7.8 m Arena fina con granulometría 0.25 – 0.125 mm 7.8 – 9.5 m Arcilla con algo de arenas finas 9.5 – 12.5 m Arena fina similar a la anterior, en la base incremento de matriz arcillosa
	H = 67 m Pcs = 5m	3.0 - 12.0 m Filtro PVC Æ =3”	
GWP_05 Piez. Santa Clara	863638, 1370953	0.0 - 3.0 m Tub ciega Æ =3”	0.0 – 0.05 m Delgada cubierta vegetal 0.05 – 0.35 m Arcilla terrosa color café a ligeramente rojiza 0.35 – 3.0 m Arcilla gris plástica con algo de arenas finas a medias 3.0 – 4.0 m Arena fina con granulometría 0.25 – 0.125 mm 4.0 – 7.5 m Arena media con granulometría 0.50 – 0.25 mm 7.5 – 10.0 m Arena gruesa con granulometría 2.0 – 1.0 mm a grava fina con granulometría superior a 3.5 mm 10.0 – 13.0 m Arena fina similar a la anterior
	H = 73 m Pcs = 6m	3.0 - 12.0 m Filtro PVC Æ =3”	

Tabla 3-3 Diseño geométrico y ubicación de los piezómetros en la zona de captura de Ciénaga Colombia

En todos, excepto en el piezómetro localizado al Norte de la Ciénaga, se detectó un nivel arenoso entre 1 y 7 metros (Aguas Ltda., 2007).

El desplazamiento de equipos de perforación con sus respectivos elementos, brocas, tuberías, bomba de lodos, herramienta general y materiales necesarios para el entubado, engravillado, lavado y cementación del espacio anular; se realizó por vía náutica y terrestre, en el que personal de perforación, lancheros, guías, conductores y demás, estuvieron coordinados con por el ingeniero geólogo residente, director de la obra de perforación (Registro fotográfico 3-1).

Como se mencionó en el aparte 3.1.2, los programas de monitoreo tienen como objetivo cuantificar la variación espacio temporal de uno o varios parámetros a través de la operación continúa y la aplicación de métodos estandarizados en un número específico de estaciones, las cuales deben estar distribuidas en la región de forma tal, que permitan reflejar perfectamente la dinámica del fenómeno estudiado. En virtud de que el ajuste de un modelo hidrológico y su posterior validación a través de modelos numéricos de flujo y transporte, requiere de una red en la que se mida precipitación, niveles superficiales y piezométricos, así como algunos puntos en los que se determinen

parámetros no conservativos para la verificación del modelo de transporte. Se define que la red de monitoreo para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia estará conformada por seis (6) puntos de monitoreo de agua lluvia (pluviómetros), doce (12) puntos de agua superficial y treinta y tres (33) puntos de agua subterránea, en los que se hace nivelación piezométrica y eventualmente la determinación de cloruros (Figura 3-6 y Tabla 3-4).

La selección de los puntos que conforman la red de monitoreo, fue realizada a partir de la superficie piezométrica preliminar que se tenía para la zona de estudio. Sobre las líneas de flujo con tendencia hacia el humedal, se establecieron puntos de nivelación piezométrica y de muestreo para análisis de cloruros. A cada punto se le asignó un código alfanumérico de identificación formado por tres letras y dos dígitos: Las tres letras permiten identificar si los punto son de agua subterránea -GWD para aljibes, GWP para piezómetros-; lluvia (SPR) o superficial (SPS). Los dígitos, corresponden a la distribución de norte a sur y de oeste a este de los puntos sobre la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia. Los puntos de agua superficial en los que se determinaron Cloruros como elemento trazador, están localizados en las principales corrientes de entrada a la Ciénaga: quebrada del Medio, quebrada Ciénaga y Caño Ucrania y, en la corriente de salida que corresponde nuevamente con Caño Ucrania. Igualmente, se localizó un punto al interior del humedal.

1. Construcción piscina de lodos
2. Perforación exploratoria y perforación de ampliación
3. Entubado del piezómetro
4. Engravillado piezómetro
5. Lavado piezómetro
6. Base en concreto y tapón sello piezómetro

Registro fotográfico 3-1 Proceso constructivo de los piezómetros en la zona de estudio

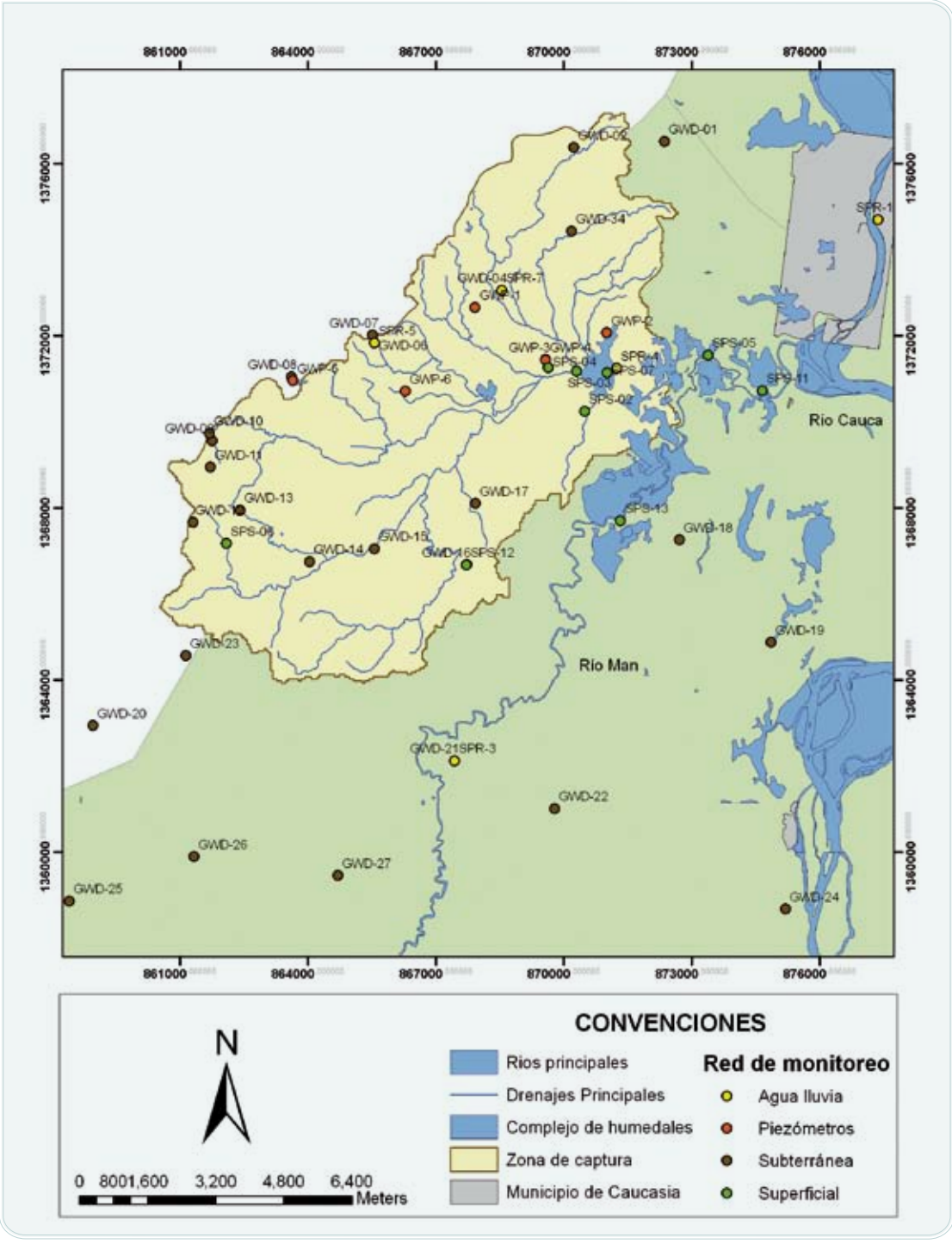


Figura 3-6 Red de monitoreo para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia

La red de monitoreo de niveles piezométricos y lluvia empezó a implementarse desde agosto de 2007, no obstante solo hasta febrero de 2008 alcanzó un grado aceptable de operación, al tener un número adecuado y bien distribuido de puntos de medición; en los cuales, a través de un proceso que involucra a la comunidad, se ha logrado conservación y continuidad en el tiempo.

Código	NOMBRE	X	Y	Piezometría	Química (Cl-)
GWD-01	La Tinaja	872358	1376514	Sí	No
GWD-02	Costa Rica	870232	1376367	Sí	Sí
GWD-03	La Siberia	870185	1374430	Sí	Sí
GWD-04	La Candelaria	868551	1373052	Sí	Sí
GWD-05	Dinastía	871243	1371241	Sí	Sí
GWD-06	El Porvenir 1	865556	1371828	Sí	Sí
GWD-07	El Porvenir 2	865518	1372011	Sí	No
GWD-08	Santa Clara	863611	1371043	No Aplica	Sí
GWD-09	Rancho Tijuana	861756	1369558	Sí	Sí
GWD-10	El Descarralado	861690	1369731	Sí	No
GWD-11	Rancho Alegre	861713	1368945	Sí	Sí
GWD-12	Mirador Las Brisas	861301	1367664	Sí	Sí
GWD-13	Santa Rosita	862399	1367943	Sí	No
GWD-14	Charrascal	864036	1366750	Sí	Sí
GWD-15	Jesusalén	865555	1367048	Sí	Sí
GWD-16	El Topacio	867724	1366677	Sí	Sí
GWD-17	Hoyo Hondo	867925	1368098	Sí	Sí
GWD-18	El Rancho	872713	1367257	Sí	No
GWD-19	El Barro	874866	1364873	Sí	Sí
GWD-20	Por Si Acaso	858952	1362937	Sí	No
GWD-21	Buenos Aires	867437	1362123	Sí	Sí
GWD-22	La Coquera	869788	1361011	Sí	Sí
GWD-23	Acapulco	861133	1364562	Sí	No
GWD-24	Diana María	875202	1358672	Sí	No
GWD-25	El Paraíso	858397	1358864	Sí	Sí
GWD-26	La Bonita	861328	1359895	Sí	Sí
GWD-27	Guarumal	864697	1359455	Sí	Sí
GWP-1	La Candelaria	867919	1372658	Sí	Sí
GWP-2	Norte Ciénaga	871010	1372062	Sí	Sí
GWP-3	Aduana-12m	869572	1371442	Sí	Sí
GWP-4	Aduana-6m	869570	1371440	Sí	Sí
GWP-5	Santa Clara	863638	1370953	Sí	Sí
GWP-6	Jalisco	866279	1370704	Sí	Sí
SPR-1	Agua lluvia	877370	1374700	No Aplica	Sí
SPR-3	Pluv. Buenos Aires	867437	1362123	No Aplica	No
SPR-4	Pluv. Dinastía	871244	1371242	No Aplica	No
SPR-5	Pluv. El Porvenir	865555	1371827	No Aplica	No
SPR-7	Pluv. Hda. Candelaria	868552	1373053	No Aplica	No
SPR-8	Pluv. Hda. UdeA	878237	1385098	No Aplica	No
SPS-01	Ucrania de Ciénaga	831371	1370237	No Aplica	Sí
SPS-02	Ucrania a Ciénaga	870497	1370237	No Aplica	Sí
SPS-03	Q. Ciénaga a Ciénaga	870299	1371170	No Aplica	Sí
SPS-04	Aduana a Ciénaga	869642	1371256	No Aplica	Sí
SPS-05	Ucrania a Man	873384	1371546	No Aplica	Sí
SPS-06	Q. del Medio – sector Santa Rosita	862082	1367171	No Aplica	Sí
SPS-07	Ciénaga Centro	871011	1371133	No Aplica	Sí
SPS-08	Ciénaga Norte	871200	1371580	No Aplica	Sí
SPS-09	Caño Ucrania	870047	1371342	No Aplica	Sí
SPS-10	Quebrada Ciénaga	870353	1371146	No Aplica	Sí
SPS-11	Man abajo	874655	1370724	No Aplica	Sí
SPS-12	Q. Ciénaga sector Topacio	867717	1366672	No Aplica	Sí

Tabla 3-4 Red de monitoreo hidrológico, hidráulico y químico para la zona de captura de Ciénaga Colombia

La comunidad que se beneficia del recurso hídrico subterráneo es quien semanalmente toma los registros de variación de nivel piezométrico estático y los milímetros de lluvia diaria en la zona, y los reporta al equipo de trabajo en hidrogeología perteneciente al grupo GIGA de la Universidad de Antioquia, mediante llamadas a celular con una periodicidad mensual. Los datos son sistemáticamente almacenados en un archivo de Excel para hacer análisis estadístico exploratorio e identificar patrones o tendencias en la información piezométrica y de lluvia que permitieran ajustar el modelo conceptual. A continuación se relacionan las personas que han colaborado (desinteresadamente y con gran compromiso) para lograr la continuidad del programa de monitoreo en la zona de estudio (Tabla 3-5 y Registro fotográfico 3-2).

Sitio	Contacto
Costa Rica	Álvaro Gutiérrez - Luz Aleida Jurado
El Porvenir - 1 y Porvenir - 2	Carlos Domínguez
Jesusalen	Daniel Ameta - Ricardo Ricaute
Piezómetros La Aduana 12m, Aduana 6m y Norte Ciénaga	Don Fidel Escorcia
La Bonita	Don Gabriel Pineda - Doña Aura
Hda La Candelaria	Don José Dario Valencia
El Barro	Don José Heredia
Por si Acaso	Don Nelson Álvarez - Doña Ana
El Rancho	Doña Emilsa
Dinastía	Doña Ismelda - Escolástico Ricardo
El Paraíso	Doña Marlibia - Julio Sierra
Hda Universidad de Antioquia	Doña Nora
La Coquera	Doña Venegilda y Don Nafer
Rancho Alegre - La Fortaleza	Edilberto Marsiglia - Jorge Sierra
El Topacio	Fabio Escobar
Piezómetro Santa Clara	Gumersindo Villadiego - Jessica
Charrascal	Jaime Sánchez
Mirador Las Brisas	Jorge Eliecer Martínez
Rancho Tijuana	José Henao - Rafael Torres
La Siberia	José Vega (Gollo) - Luis Álvarez
La Tinaja	Luis Álvarez
Acapulco	Luis Javier
Piezómetros Jalisco y La Candelaria	Luis Teherán
Doña María	Oscar Granados
Buenos Aires	Roberto Villadiego
Guarumal	Roberto Villadiego

Tabla 3-5 Lista de colaboradores de la red de monitoreo piezométrico

En el transcurso del proyecto se realizaron ocho campañas de monitoreo de variables hidráulicas (niveles piezométricos, nivel de las corrientes y del humedal e Intentos de aforo) y químicas (medición de cloruros); en septiembre y noviembre de 2007, febrero, abril y noviembre de 2008, febrero y noviembre de 2009 y marzo de 2010. Las determinaciones de cloruros a las muestras se llevaron a cabo en el laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA certificado por el IDEAM.

La medición de caudales de entrada y salida a la Ciénaga fue una actividad imposible de concretar por métodos de aforo tradicionales dadas las condiciones agrestes del terreno (Registro fotográfico 3-3) que impidieron la localización de secciones de calibración en los cauces, que pudieron servir como estaciones permanentes de medición de niveles. No obstante se logró la medición aproximada de una de las corrientes en la parte alta (Q. del Medio) por el método del flotador. Consientes que este no es un método preciso, se considera que permite inferir órdenes de magnitud con respecto a las dinámicas de flujo de las corrientes de entrada al humedal.

En el centro del humedal se instaló una mira de bambú de 5.80 metros de altura, con la cual fue posible en cada jornada de campo obtener la variación del nivel en la ciénaga (Registro fotográfico 3-4).

Con el apoyo de CORANTIOQUIA se logró gestionar ante el Instituto de Meteorología y Asuntos Ambientales (IDEAM), información para la caracterización climatológica de la zona de estudio, empleando los registros hidrometeorológicos de 27 estaciones: 19 Pluviométricas (PM), 5 Climatológicas (CO) y 3 Limnimétricas (LM). Toda la información fue suministrada sin ningún costo, solo con fines académicos y de investigación (Figura 3-7).

Al inicio de la red de monitoreo se diseñaron una serie de pluviómetros para lograr cuantificar la precipitación diaria (Registro fotográfico 3-5). Igualmente, se aprovechó que en algunas de las haciendas ganaderas contaban con pluviómetro como en el caso de Hacienda La Candelaria y El Porvenir. Sin embargo, se tuvieron inconvenientes con la capacidad de los pluviómetros iniciales y fue necesario el rediseño de los mismos, pero que por cuestiones económicas y de regularidad en la toma de datos, después de un tiempo se volvieron inoperantes.

Don Fidel Escorcia
(Aduanas y Norte Ciénaga)

Doña Ismelda (Dinastía)

Álvaro Gutiérrez
(Costa Rica)

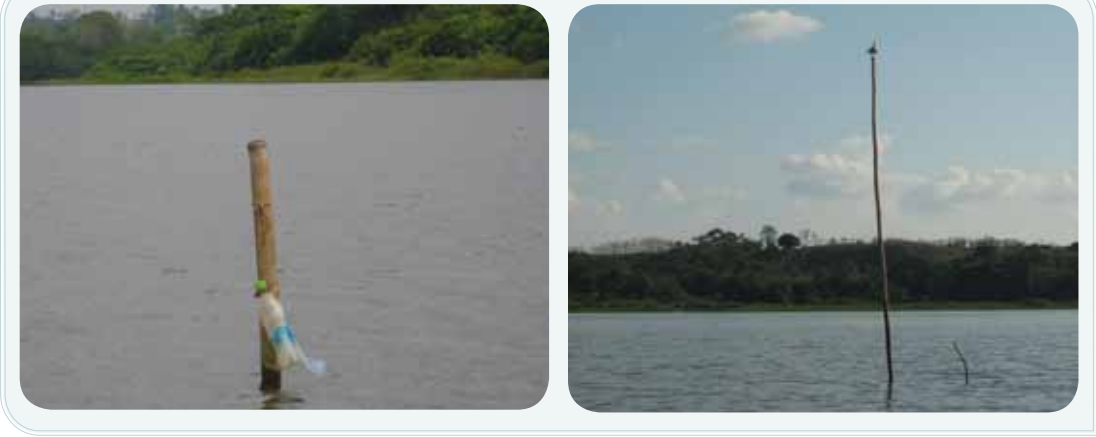
Luis Teherán
(Jalisco y La Candelaria)

Don Gumersindo
(Piez. Santa Clara)

Edilberto Marsiglia
(La Fortaleza)

Registro fotográfico 3-2 Colaboradores de la red de monitoreo piezométrico

Registro fotográfico 3-3 Condiciones de acceso para la realización de aforos



Registro fotográfico 3-4 Localización de la mira para la medición del nivel de agua

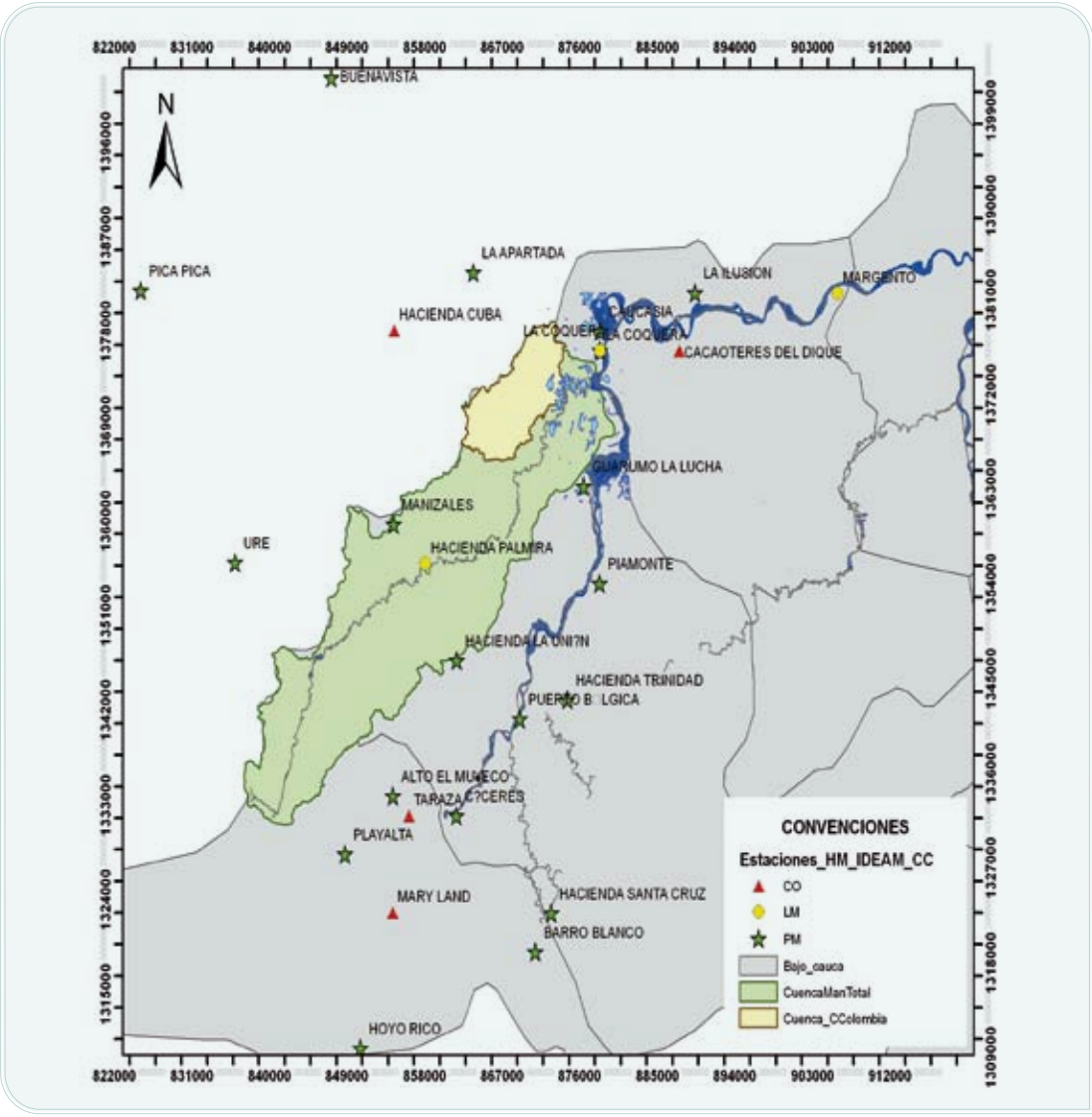


Figura 3-7 Estaciones hidrometeorológicas disponibles en la zona de captura de Ciénaga Colombia (Fuente: IDEAM)

Registro fotográfico 3-5 Pluviómetros instalados y operados con la comunidad

3.2.2.1 Análisis de los datos hidrometeorológicos y de nivel piezométrico

La información hidrometeorológica y de nivel piezométrico disponible, y aquella obtenida de la operación del programa de monitoreo, fue explorada y analizada estadísticamente para evaluar la representatividad de los datos y descartar posibles inconsistencias y anomalías producto de la toma o registro de la información. Luego, mediante la aplicación de los métodos de interpolación espacial disponibles en el SIG ArcGIS 9.2, se construyeron las superficies piezométricas promedio a escala anual y mensual para identificar los patrones de flujo subterráneos, así como las superficies continuas para algunas variables hidrometeorológicas de interés en la caracterización de los regímenes hidrológicos de la zona de estudio.

El procesamiento y análisis conjunto de la información de nivel piezométrico y de precipitación, permitió la búsqueda de posibles de patrones entre la variación espacial de la lluvia y su relación con las dinámicas de flujo superficial y subterráneo. Adicionalmente, con los registros de las variaciones de nivel freático, de un año de observación (Periodo Diciembre 2007 – Noviembre 2008), se realizaron cálculos a escala mensual de la recarga al medio acuífero. Luego empleando métodos de balance hídrico fue posible estimar valores aproximados de los caudales que fluyen por la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, variable imposible de determinar en campo.

3.2.3. Modelo numérico hidrodinámico y de transporte de solutos

Cuando se ha definido que un modelo numérico constituye un procedimiento adecuado para explorar o simular las interacciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, se procede a su diseño, construcción e implementación. Este se inicia con la superposición de una matriz de nodos al dominio hidrológico de análisis de acuerdo con la técnica numérica empleada: diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos, diferencias finitas integradas, métodos de elementos de frontera y, elementos analíticos, entre otros. Los tres primeros son los procedimientos más usados actualmente para resolver problemas de flujo y transporte, siguiendo los protocolos estándar de modelación, acoplados a diferentes códigos de modelación; los cuales han sido ampliamente utilizados, probados y verificados por la comunidad académica que se ocupa de la modelación hidrogeológica.

El alcance de los modelos numéricos depende de la calidad de la información con la que son alimentados y que para el caso objeto de estudio, el mayor volumen de información disponible se concentró en el acuífero libre producto de los estudios de exploración hidrogeológica realizados en el Bajo Cauca antioqueño, consolidados en un trabajo de carácter regional (Betancur, 2008).

En la construcción del modelo numérico de flujo y transporte de solutos para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia se empleó la información relacionada en los apartes 3.2.1 y 3.2.2 con relación al modelo hidrológico conceptual y el diseño e implementación del programa de monitoreo, respectivamente.

El código de computador seleccionado para resolver el modelo matemático fue el MODFLOW - Modular finite-difference ground-water flow model – (McDonald y Harbaugh, 1988). El cual tiene una estructura modular que consiste de un programa principal y una serie de subrutinas en paquetes. Cada paquete representa alguna característica específica del sistema hidrológico como recarga, evapotranspitación, ríos y drenes. Además, desde su desarrollo original, han sido incorporados al programa un amplio rango de módulos adicionales, tales como anisotropía variable en el espacio y re-humedecimiento de celdas.

Existen diferentes adaptaciones comerciales de este software. En la presente investigación se empleó Groundwater Vistas (GV), versión 4.25 (Rumbaugh y Rumbaugh 2004), el cual integra un sistema de diseño de modelos con herramientas de procesamiento grafico que trabajan como una interfaz para los modelos de flujo (MODFLOW, MODPATH, SEAWAT) y transporte de solutos (MT3DMS) en tres dimensiones. La Universidad de Antioquia, cuenta con licencia para su utilización suministrada para fines académicos por la empresa productora y comercializadora Environmental Simulations Inc (ESI).

Partiendo de la base que la modelación numérica constituye una herramienta de apoyo a la exploración de un modelo hidrológico conceptual, el procedimiento de análisis seguido para su implementación combinó con un ligero desfase en el tiempo, la construcción del modelo hidrológico conceptual (Figura 3-2) y el protocolo de modelación de flujo y transporte de solutos (Figura 3-4).

Guiados por lo estándares de modelación y por los propósitos establecidos para ella, se presenta el procedimiento de análisis que se siguió para el diseño e implementación de los modelos numéricos de flujo y transporte de solutos, este último como una primera aproximación al fenómeno en la zona de estudio.

a. Diseño del modelo: Para el diseño del modelo numérico, se tuvieron en cuenta la extensión del área a modelar que se constituye en 84 Km^2, el nivel de detalle de la información disponible (Cartografía básica del IGAC – Escala 1:25.000) y la escala de trabajo a la cual se construyó el modelo hidrogeológico conceptual (Escala 1:10.000), para así definir, inicialmente, el numero de capas y el espaciamiento nodal que arrojará un numero de celdas adecuado y a la vez razonable, en términos de la magnitud de memoria computacional a ocupar y del tiempo de ejecución de cada corrida del modelo. El modelo conceptual proporcionó los elementos necesarios para localizar fronteras del sistema y definir los valores semilla de los parámetros hidráulicos.

El grado de discretización temporal de la información concerniente a nivelaciones piezométricas y la dinámica del ciclo hidrológico, que condiciona el comportamiento de la recarga en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia; fueron empleados

para definir los periodos estrés hidrológico y las condiciones de frontera del estado transitorio.

b. Ingreso de la información al modelo: Se implementó una interface tipo **Linked** en la que SIG y modelo son básicamente autónomos, con el fin de preparar los archivos de entrada y editar las salidas del GV. Con la información disponible del modelo conceptual -modelo digital de elevación, geometría de las unidades hidrogeológicas, superficies piezométricas-, se elaboraron mapas tipo raster con el mismo origen de coordenadas y tamaño de celda que tendría el modelo numérico. Antes de proceder a preparar los formatos para configurar los archivos de entrada a GV, se practicó una minuciosa revisión del modelo conceptual, particularmente a su geometría, con el fin de detectar los ajustes que debían practicarse con miras a prevenir la ocurrencia de errores numéricos durante la ejecución del modelo. La revisión abordó aspectos tales como: garantizar continuidad lateral entre las celdas de cada unidad hidrogeológica, cerciorarse, a partir de la cartografía básica, que las corrientes de agua superficial tuvieran en el sentido de la escorrentía y entre celdas consecutivas una relación topográfica lógica, verificar una posición altitudinal correcta que explicara físicamente la relación entre corrientes y cuerpos lénticos de agua.

Los mapas tipo raster que identificaban para cada unidad hidrogeológica las áreas activas del modelo, con valor de celda uno, e inactivas, con valor de celda cero, fueron convertidas a matrices en formato ASCII y así importadas luego a GV (Figura 3-8). Todos los demás atributos del modelo hidrogeológico, asignados a cada celda -espesores, fronteras, propiedades hidráulicas- fueron importadas a GV como archivos shape file de ArcGIS; para lograrlo se requirió preparar una malla base -un archivo shape- que capturara desde los mapas raster cada propiedad estableciendo una relación uno a uno entre cada polígono de la malla y cada celda del raster (Figura 3-9). A cada mapa tipo shape obtenido se le definían los campos de atributos necesarios para tener toda la información requerida en el GV al momento de ingresar cada categoría de información tanto en el estado permanente como transitorio (Figura 3-10).

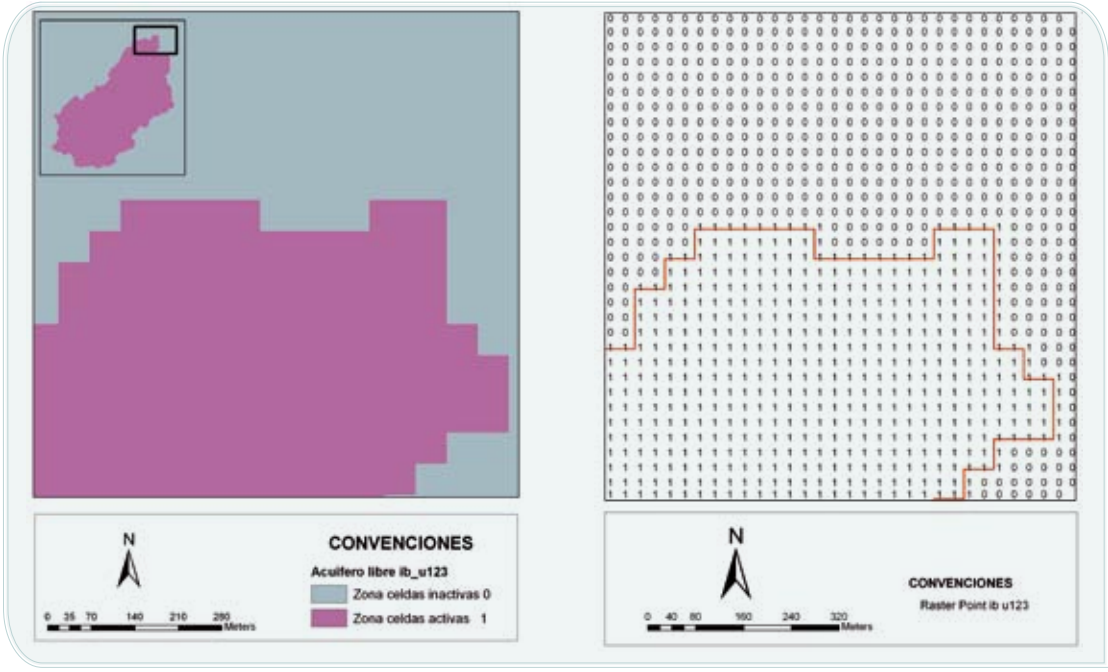


Figura 3-8 Relación entre un mapa raster (izq.) y un archivo ASCII (der.) para trasladar celdas activas e inactivas desde ArcGIS a GV

En el capítulo de resultados correspondiente al modelo numérico de flujo y el modelo preliminar de transporte de solutos se muestra en detalle los resultados de cada uno de las fases establecidas en los protocolos de modelación.

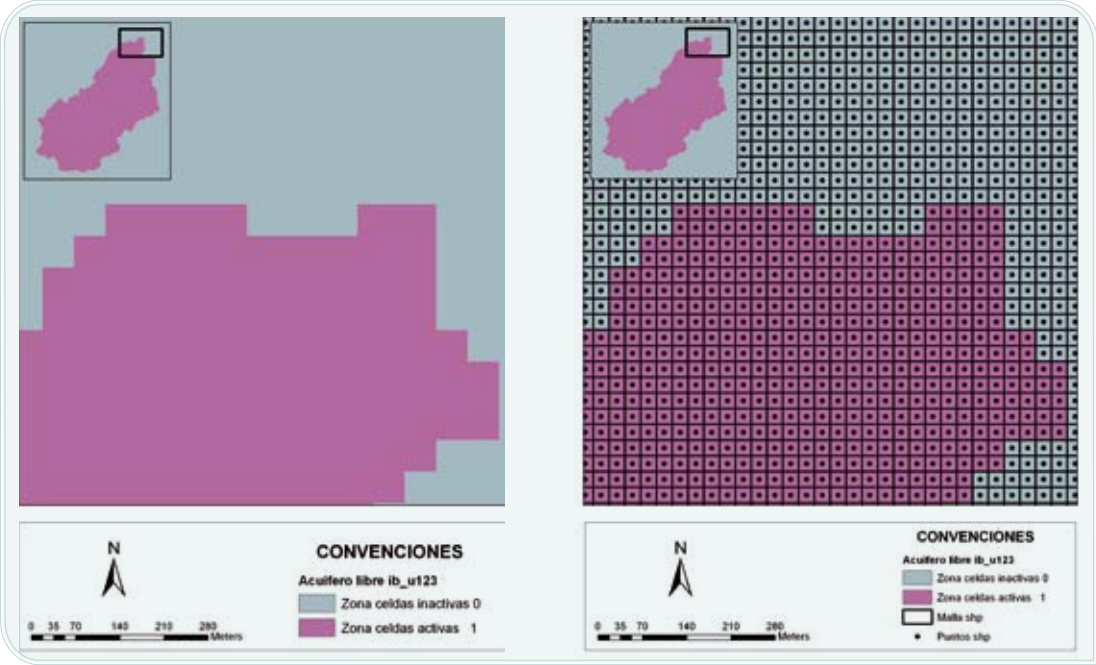


Figura 3-9 Relaciones entre mapas tipo raster y shape file para exportar la información a GV (*)
(*) A cada celda del mapa raster (izquierda) le corresponde dos mapas shape, uno de puntos y otro de polígonos (derecha) a través de los cuales se puede capturar información a ingresar a GV

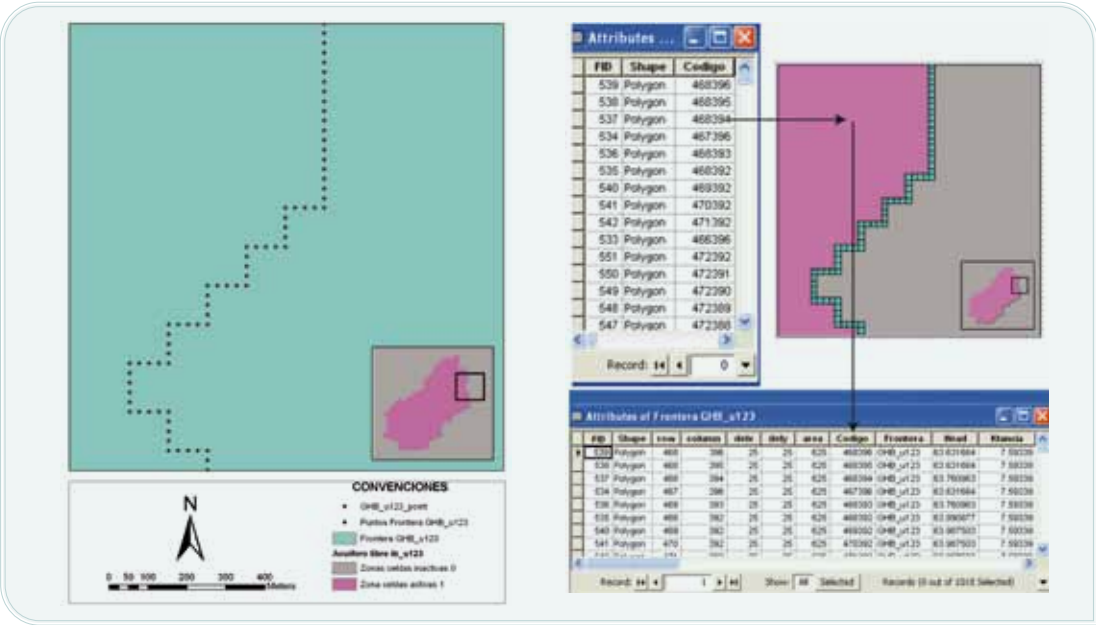


Figura 3-10 Relación entre mapas tipo raster y shape en la definición de atributos con información para exportar a GV (*)

(*) Un punto localizado en el centro de cada celda raster captura el atributo de interés y luego mediante una relación uno a uno, establecida a través de un campo común (Código) entre los puntos y la malla se completa los datos de la propiedad que se ingresa a GV

c. Calibración: Antes de iniciar el ejercicio de ajuste de fronteras y parámetros para calibrar el modelo en estado permanente, se practicaron pruebas de análisis de sensibilidad que permitieran definir las condiciones iniciales y establecer los criterios de convergencia con los que se ejecutó el programa. Luego, aplicando fundamentalmente el método de ensayo y error y, con ocasionales exploraciones mediante el modulo de calibración automática MODFLOW2000, se buscó la solución que reprodujera lo mejor posible las condiciones de campo según la conceptualización del modelo. Una vez lograda la calibración del modelo en estado permanente se realizó un nuevo análisis de sensibilidad a los parámetros y se procedió a la calibración en estado transitorio. La historia de los repetidos ensayos para cada intento: fecha, propósito, condiciones del modelo, condiciones de la simulación y resultados fueron consignados en un diario de modelación.

.

4. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LAS INTERACCIONES AGUA SUBTERRÁNEA - HUMEDAL

“Lluvia Regen Pioggia Pluie”

Lluvia regen pioggia pluie
crea cúpulas vértigos confianzas
sencillamente cae sobre tus hombros
golpea en el paraguas que no puede
sentir que llueve en cuatro en ocho idiomas
se derrama quién sabe en qué mapa de sueños
con bombardeos llantos y sirenas
con recuerdos que empiezan a chorrear
con árboles que piden y no esconden
la mano o rama o pájaro o deseo
con el débil relámpago que nadie
con el trueno que se metió en su nido
llueve con voluntad igualadora
sencillamente cae sobre tus hombros
aquí y en otras tardes otras noches
con estos goterones o con otros
en inviernos en selvas en esquinas
en umbrales en huellas en abrazos
mojando estas caricias o esas muertes
sin escándalo llueve en las palabras
y hasta en el corazón llueve sin ruido
como plomo como alas como labios
llueve besando llueve como grito
en cuatro en seis en ocho en diez idiomas
en veinte o treinta desesperaciones
como cortina llueve o como cielo
sencillamente cae sobre tus hombros.

Mario Benedetti. Contra los puentes levadizos.

4. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LAS INTERACCIONES AGUA SUBTERRÁNEA - HUMEDAL

En este capítulo se presenta un modelo hidrológico conceptual que describe las interconexiones entre los compartimentos superficial, atmosférico y subterráneo; siguiendo como protocolo de trabajo la formulación metodológica presentada en el capítulo 3. Este modelo se basa en los resultados del análisis e interpretación de la información disponible y la obtenida a partir del programa de monitoreo desarrollado entre los años 2007 y 2010 en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

Los resultados serán abordados desde una visión sistémica de la zona de estudio, en la que no solo se evalúan los componentes directamente involucrados: medio acuífero, corrientes superficiales y cuerpos lénticos; sino también cada uno de los procesos naturales responsables de los intercambios de flujo: precipitación, evapotranspiración, flujo subterráneo y escorrentía superficial.

Particularmente, el humedal Ciénaga Colombia será considerado como un sistema abierto que intercambia materia y energía, desde y hacia sus fronteras.

4.1. Caracterización del medio físico natural

En este numeral se hace una breve descripción de las características fisiográficas, hidrográficas, climáticas, geológicas, edafológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio.

4.1.1. Fisiografía.

Para el entendimiento de los sistemas hidrológicos y la descripción de los procesos de flujo que se dan entre sus componentes, es fundamental la caracterización del relieve, dado que constituye un factor clave en la identificación de zonas de recarga a los acuíferos, configuración de las redes de drenaje y zonas de captura de sistemas lénticos, delimitación de cuencas hidrográficas y la identificación de posibles interconexiones entre compartimentos.

La zona de captura del humedal Ciénaga Colombia presenta una topografía suave con superficies planas y onduladas, que varían altitudinalmente entre 50 y 100 m.s.n.m (Figura 4-1), y donde las pendientes no superan el 10% (Figura 4-2).

Geomorfológicamente, el entorno de Ciénaga Colombia hace parte de la superficie de erosión Caucasia y las superficies aluviales de los ríos Cauca y Man, identificándose geoformas como: bajos y ciénagas, cargueros, colinas bajas y valles (Universidad Nacional - CORANTIOQUIA, 2002).

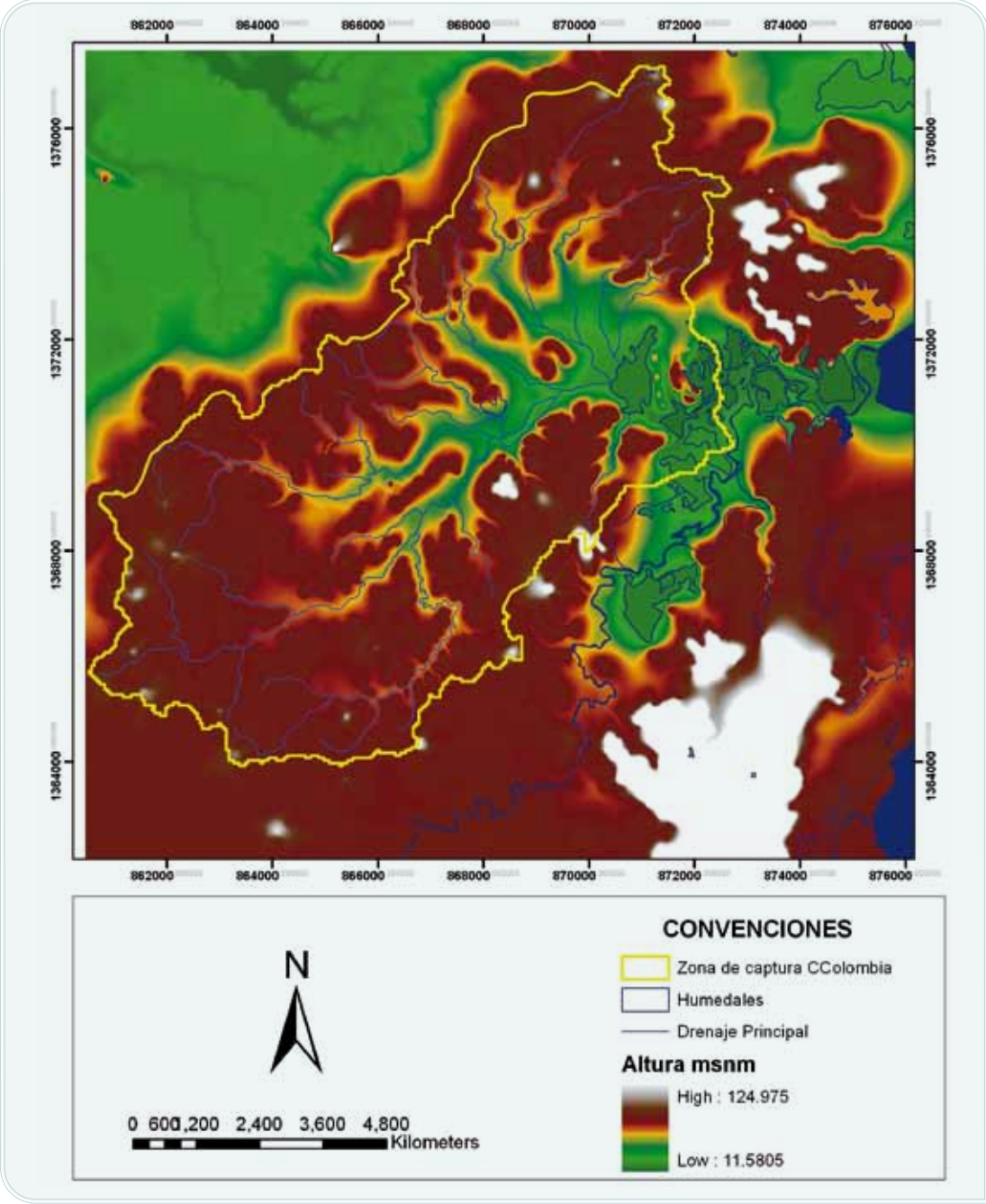


Figura 4-1 Modelo Digital de Elevación con resolución 10 m para la zona de captura de Ciénaga Colombia (Quintero et al., 2009)

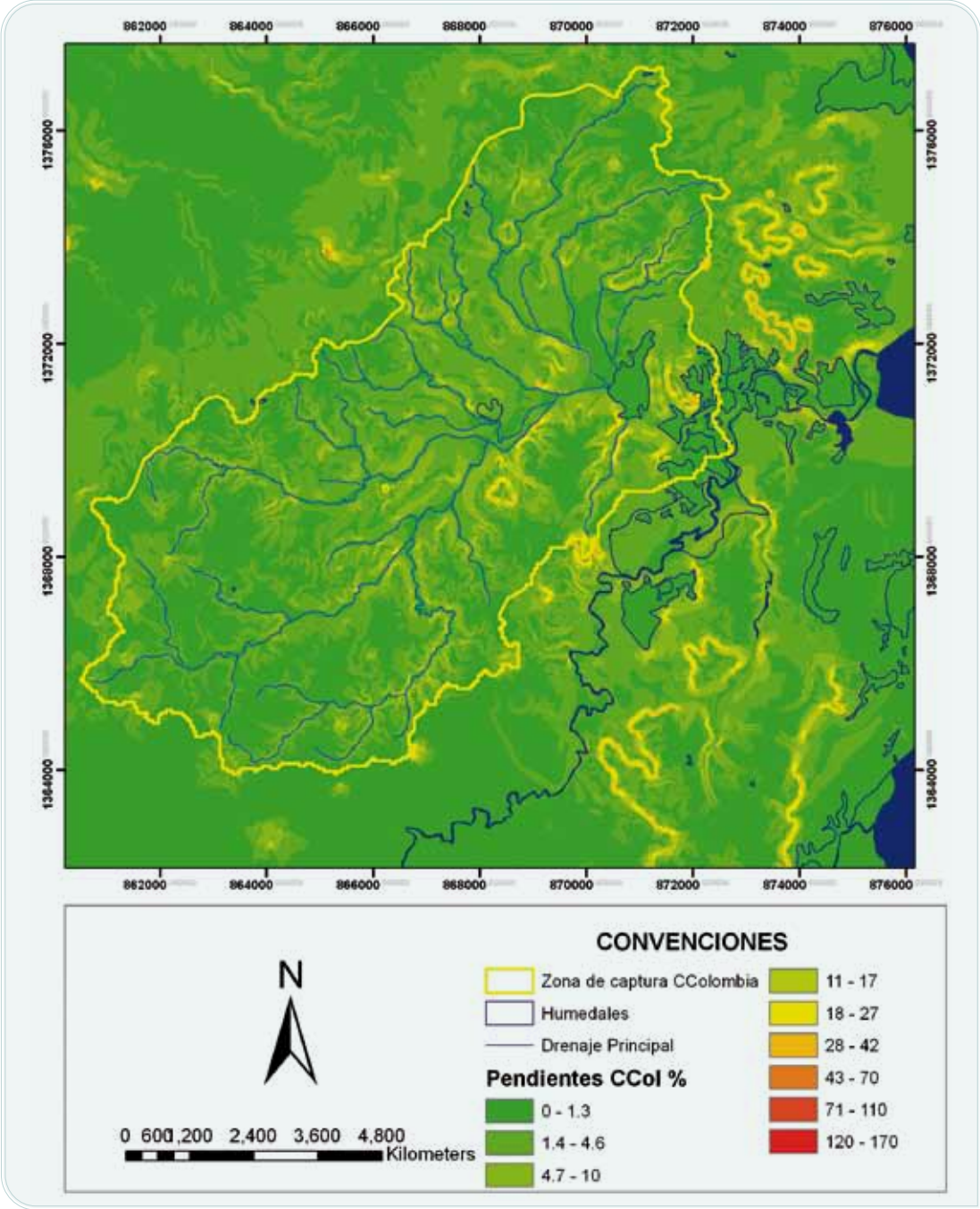


Figura 4-2 Caracterización de la distribución de pendientes en la zona de captura de Ciénaga Colombia

4.1.2. Hidrografía

El humedal Ciénaga Colombia hace parte del complejo de humedales de la cuenca baja del río Man (Figura 4-3) y es alimentado por tres corrientes: Q. Aduana, Q. Ciénaga y Caño Ucrania. Esta última, corresponde a la quebrada principal, que recoge las aguas desde la Vereda Santa Rosita, donde recibe el nombre del tributario principal, quebrada del Medio.

Figura 4-3 Localización del Humedal Ciénaga Colombia (Google Earth, 2009)

Con el análisis de la imagen satelital Landsat 1994 (subescena 954) se detectó la presencia de pequeñas ciénagas, que podrían desempeñar una función de trascendencia en la dinámica hídrica del sistema hidrológico en la cuenca baja del rió Man (Figura 4-4). Luego, mediante la georreferenciación de puntos de control en las jornadas de trabajo en campo, se corroboró la presencia de algunos de estos humedales que no superan 1m de profundidad y que se manifiestan principalmente en los límites NW, W y SW de la zona de captura (Figura 4-5 y Registro fotográfico 4-2).

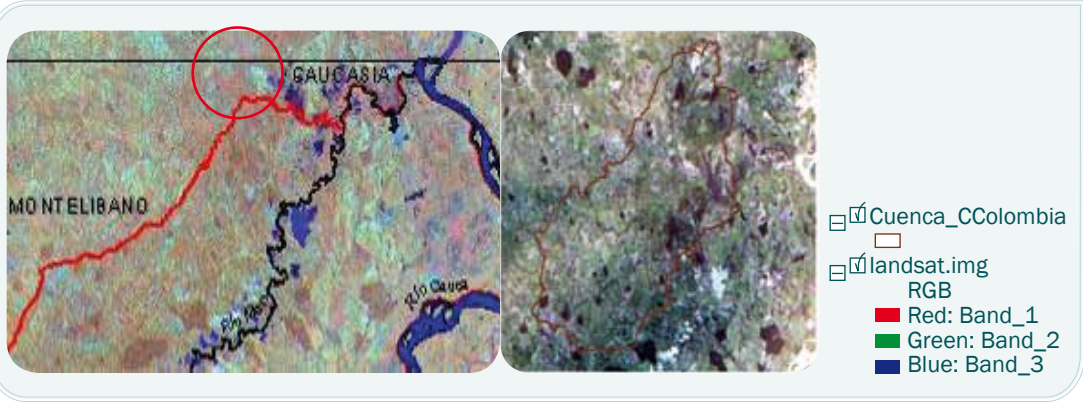


Figura 4-4 Imagen georreferenciada en la zona de estudio (Landsat 1994 – subescena 954

A partir de los resultados de análisis granulométricos de sedimentos (Figura 4-6 y Tabla 4-1) fue posible inferir la permeabilidad del lecho de algunas corrientes y de la ciénaga (Tabla 4-2). En general, los lechos de las corrientes son de carácter arenoso con algún contenido de grava.

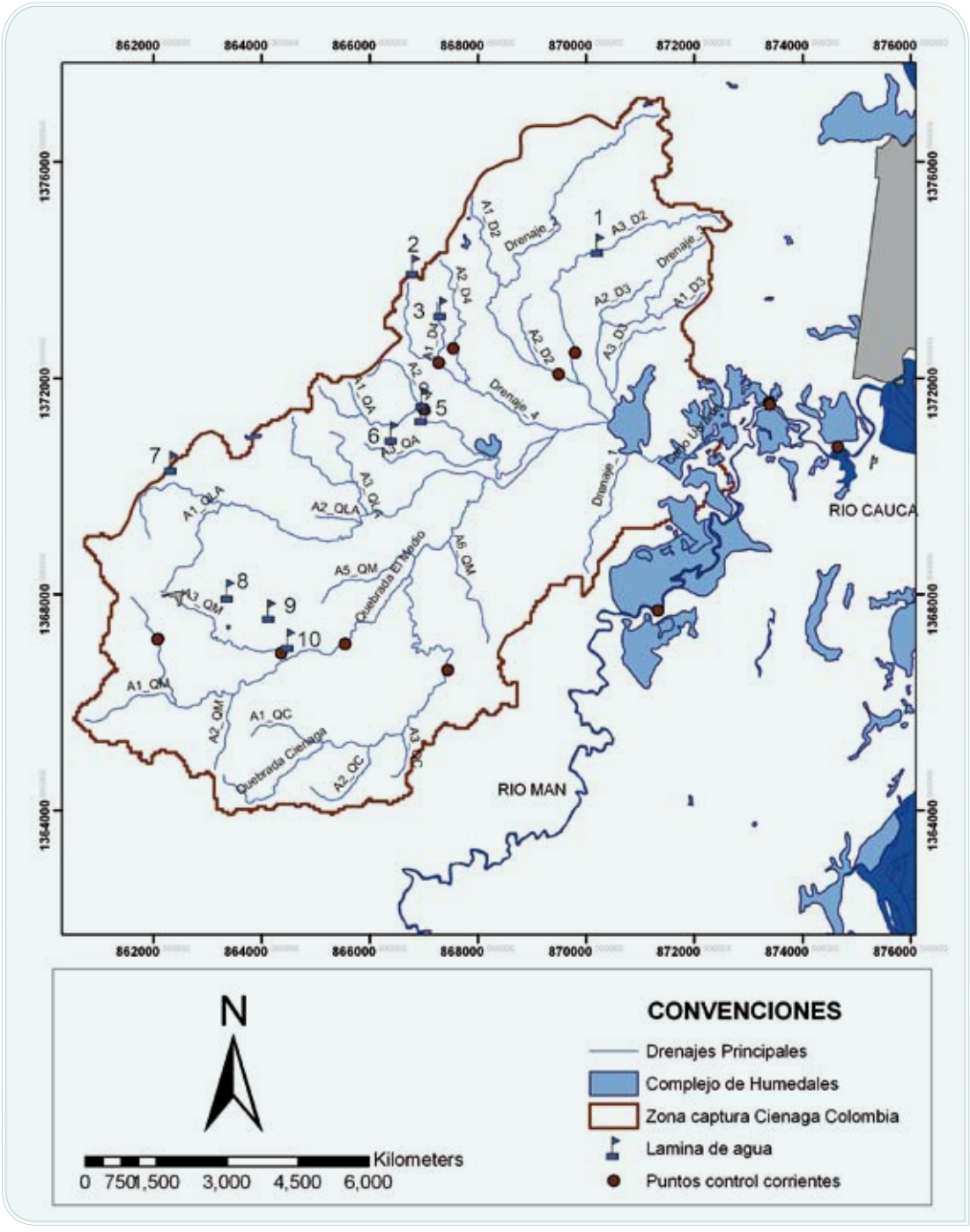


Figura 4-5 Hidrografía zona de captura de Ciénaga Colombia

1. Fosa sector La Siberia

3. Fosa Piezómetro La Candelaria

6. Fosa sector Piezómetro Jalisco

7. Fosa Piezómetro Santa Clara

8. Fosa sector Santa Rosita

10. Fosa sector Charrascal

Registro fotográfico 4-1 Identificación de pequeños humedales en la zona de captura de Ciénaga Colombia

Código	Análisis Granulométrico							Clasificación suelo (U.S.C) Sistema unificado			
	Muestra lecho	d_{10} mm	d_{30} mm	d_{60} mm	Cu ad	Tipo granulometría	Cc ad	Tipo de suelo	Tipo	convención	Significado
1	Q. El Medio -Santa Rosita	0,43	0,64	1,3	3,02	Heterogénea	0,73	Grueso Granular	Arena	SP	Arena con poco o nada de finos. Mal gradada
2	Caño Ucrania	0,27	0,89	2,4	9,06	Heterogénea	1,25	Grueso Granular	Arena	SW	Arena con poco o nada de finos. Bien gradada
3	Q. del Medio Sector Jesusalén	0,14	0,27	0,41	2,93	Heterogénea	1,22	Grueso Granular	Arena	SP	Arena con poco o nada de finos. Mal gradada
4	Q. Aduana	0,34	0,48	0,82	2,41	Heterogénea	0,83	Grueso Granular	Arena	SP	Arena con poco o nada de finos. Mal gradada
5	Q. Ciénaga Sector Topacio	0,12	0,34	0,5	4,17	Heterogénea	1,93	NE	NE	SW-SM	Arena con poco o nada de finos. Bien gradada - Con porcentaje apreciable de finos. Arena limosa

NE: No especificado

Tabla 4-1 Clasificación de los sedimentos de las corrientes en la zona de captura

Código	Muestra lecho	Métodos indirectos para el cálculo de K							
		Hazen			Kozeny-Carman *medio saturado			Breyer	
		C	f(n)	K(m/d)	C	f(n)	K (m/d)	C	K (m/d)
1	Q. El Medio - Santa Rosita-	6,00E-04	9,00E-01	96,94	0,0083	0,0147	21,91	0,0013	238,95
2	Caño Ucrania	ND	ND	ND			8,32	0,001	71,26
3	Q. El Medio Sector Jesusalén	6,00E-04	9,00E-01	10,28			2,32	0,0013	25,49
4	Q. Aduana	6,00E-04	9,00E-01	60,61			13,7	0,0014	156
5	Q. Ciénaga – Sector Topacio-	6,00E-04	9,00E-01	7,55			1,71	0,0012	17,44

ND: No determinado.

Tabla 4-2 Resultados de permeabilidad en los lechos de las corrientes en la zona de captura

Respecto a las características del lecho del humedal, en la estación correspondiente a la localización de la mira para la medición del nivel de agua, fue recuperado un núcleo de 20 cm de espesor que comprende tres estratos (Figura 4-7), de material que varía entre limo-arenoso a limo-arcilloso.

El estrato del techo con ocho centímetros de espesor, color gris oliva oscuro, textura limosa con presencia de algunas raíces finas, no tenía estructura y como rasgo particular se encontraron manchas de oxidación a través de todo el perfil lo que indica que ha estado sometido a desecación o aireación de la columna de agua en periodos de estiaje. En el segundo estrato, con diez centímetros de espesor y de color negro (5Y2.5/2)[1] se apreció un cambio en la textura a limo-arenosa, no tenía estructura y como rasgó particular se notó presencia de materia orgánica sin descomponer como raíces finas probablemente provenientes de macrófitas flotantes u otro tipo de fauna típica. El tercer estrato correspondiente a los 18 a 20 cm, es decir, con dos centímetros de espesor, tenía color (5GY4/1)2 grisáceo azulado oscuro, textura limo-arcillosa, sin estructura y como rasgo particular se señaló pseudoagrietamiento.

1,2 *Munsell Soil Color Chart, 1975*

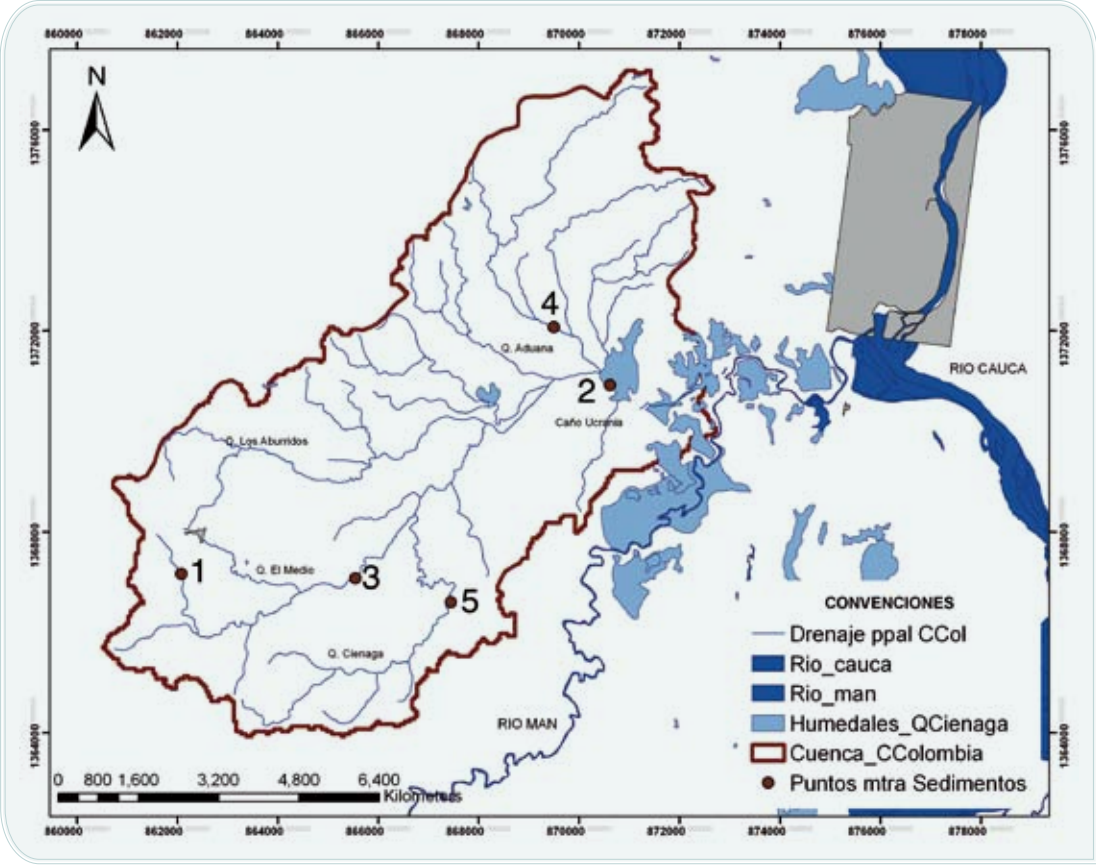


Figura 4-6 Localizacion de las muestras para analisis de sedimentos

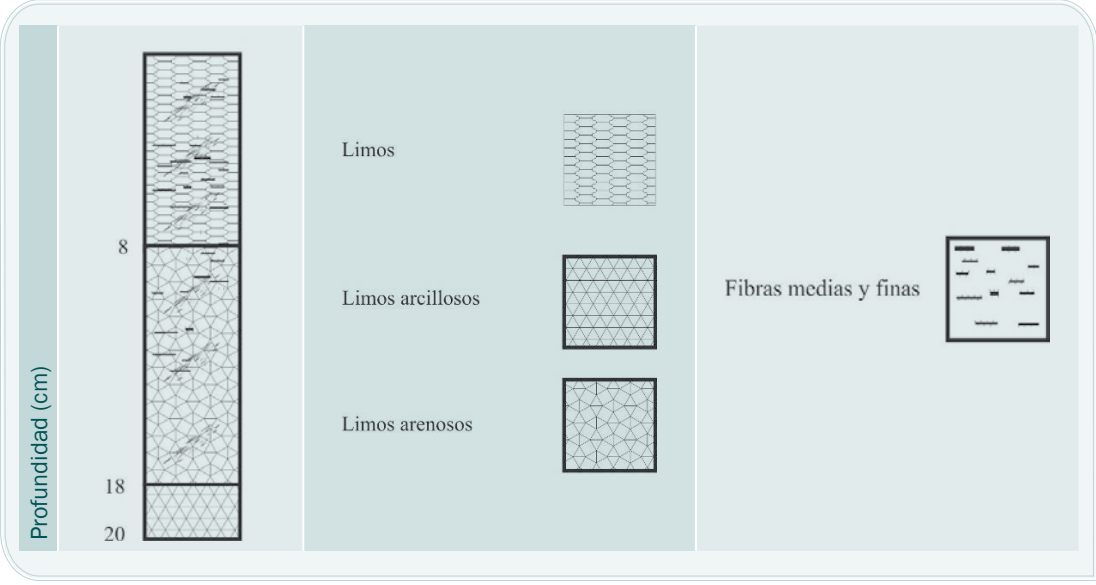


Figura 4-7 Perfil estratigráfico de los sedimentos del humedal Ciénaga Colombia

Con la información anterior y apoyados en las tablas que se reportan en la literatura para la estimación de la conductividad hidráulica de materiales fino-granulares se adopta un valor de 0.5 m/d para los sedimentos del lecho del humedal Ciénaga Colombia.

La espacialización de la distribución de los sedimentos en el humedal Ciénaga Colombia (Figura 4-8), fue realizada a partir de la interpolación de la información recolectada en campo durante la jornada realizada en febrero de 2009, en la cual se tomaron muestras de sedimento, medición de su espesor y nivel del agua. Igualmente, apoyados en el Modelo Digital de Elevación, también fue posible obtener una representación de la batimetría del humedal para un tamaño de celda de 25 m (Figura 4-9).

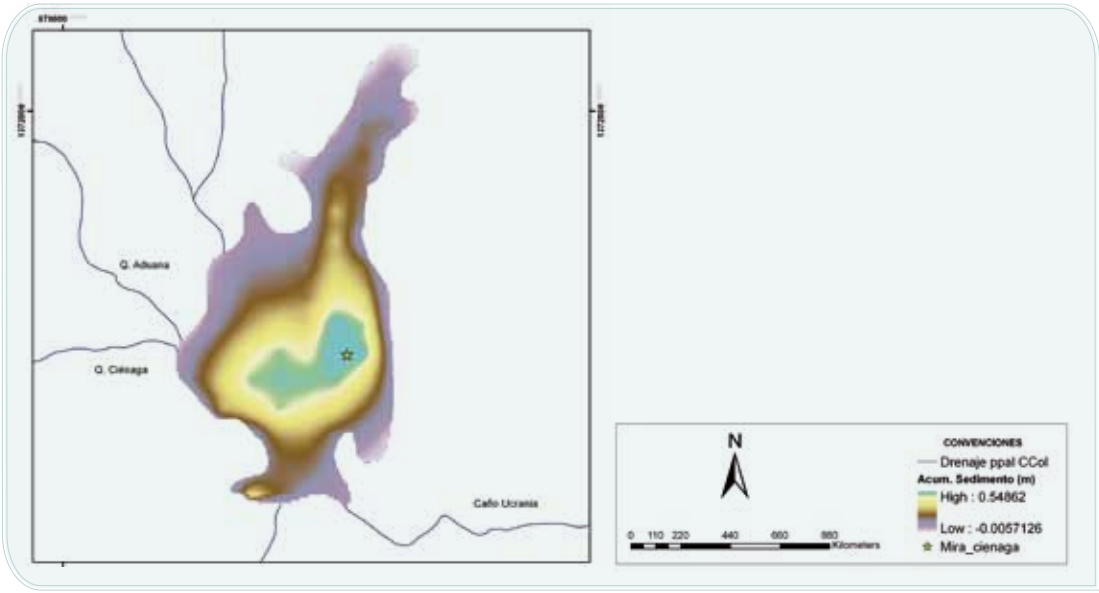


Figura 4-8 Distribución de sedimento en el humedal Ciénaga Colombia

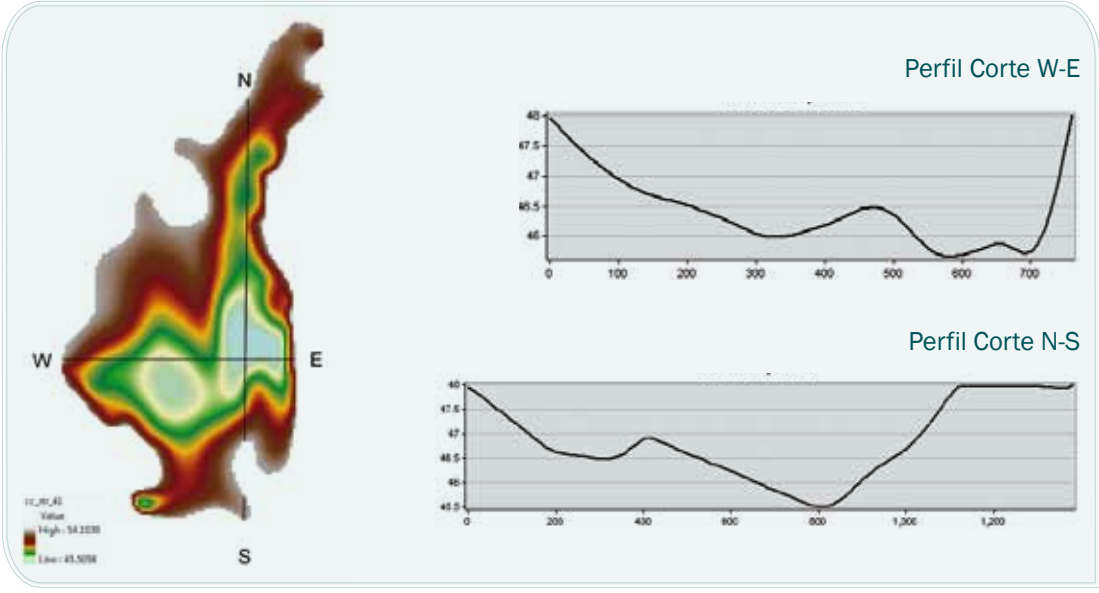


Figura 4-9 Batimetría y perfiles topográficos en el humedal Ciénaga Colombia

Periódicamente en cada jornada de campo y en ocasiones, gracias a la colaboración de la comunidad de pescadores, fue posible realizar mediciones de la variación del nivel de agua en el humedal (Tabla 4-3).

Fecha (mm/dd/aa)	Profundidad (m)	Observaciones
3/10/2007	0,1	Reconocimiento 1
8/24/2007	2,77	Reconocimiento 2
2/28/2008	2,05	Comisión campo 3
4/23/2008	1,9	Comisión campo 4
6/20/2008	3	Reporte Comunidad
7/10/2008	3,5	Reporte Comunidad
8/12/2008	2,45	Reporte Comunidad
11/25/2008	3,6	Comisión campo 5
1/15/2009	2,5	Reporte Comunidad
2/1/2009	1,83	Comisión campo 6
3/15/2009	0,8	Reporte Comunidad
4/16/2009	2,5	Reporte Comunidad
6/21/2009	0,5	Reporte Comunidad
7/21/2009	0,8	Reporte Comunidad
8/21/2009	0,3	Reporte Comunidad
9/21/2009	0,25	Reporte Comunidad
10/21/2009	1,3	Reporte Comunidad
11/29/2009	0,9	Comisión campo 7
3/16/2010	0,1	Comisión campo 8

Tabla 4-3 Variación del nivel de agua en el humedal Ciénaga Colombia

Mediante el uso de las herramientas SIG (Surface Volumen de la extensión 3D Analyst Tools), se realizó la estimación de la capacidad de almacenamiento del humedal a diferentes alturas según su configuración topográfica, obteniéndose las siguiente relación (Tabla 4-4 y Figura 4-10).

Cota (m.s.n.m)	Volumen de almacenamiento (Mm3)
54	4,695
53	3,964
52	3,302
51	2,64
50	1,978
49	1,316
48	0,654
47	0,1807

Tabla 4-4 Relación Cota – Volumen en el humedal Ciénaga Colombia

Con la información anterior, y a partir de un análisis soportado en los valores de precipitación promedio diaria anual (8,7 mm) y máxima diaria anual (165 mm) registrados en el periodo Noviembre 2007- Noviembre 2008 en la estación Hacienda La Candelaria -sector Santa Rosita-, fue posible identificar que la ocurrencia de una lluvia diaria neta del orden de 56 mm en toda la zona de captura ocuparía la capacidad máxima de almacenamiento del humedal Ciénaga Colombia, que a la altura límite de su extensión (54 msnm) es de 4.695.000 m^3 de agua. También fue posible estimar los volúmenes de agua correspondientes a los valores de nivel registrados (Tabla 4-5).

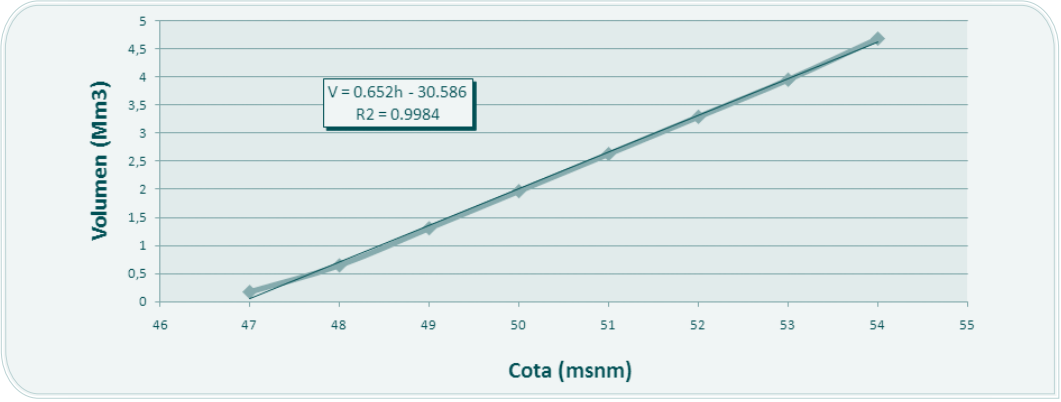


Figura 4-10 Relación Cota – Volumen humedal Ciénaga Colombia

Fecha (mm/dd/aa)	**Profundidad (m)**	**Cota (msnm)**	**Volumen de agua estimado (m^3)**
3/10/2007	0,1	47,1	123.200
8/24/2007	2,77	49,77	1.864.040
2/28/2008	2,05	49,05	1.394.600
4/23/2008	1,9	48,9	1.296.800
6/20/2008	3	50	2.014.000
7/10/2008	3,5	50,5	2.340.000
8/12/2008	2,45	49,45	1.655.400
11/25/2008	3,6	50,6	2.405.200
1/15/2009	2,5	49,5	1.688.000
2/1/2009	1,83	48,83	1.251.160
3/15/2009	0,8	47,8	579.600
4/16/2009	2,5	49,5	1.688.000
6/21/2009	0,5	47,5	384.000
7/21/2009	0,8	47,8	579.600
8/21/2009	0,3	47,3	253.600
9/21/2009	0,25	47,25	221.000
10/21/2009	1,3	48,3	905.600
11/29/2009	0,9	47,9	644.800
3/16/2010	0,1	47,1	123.200

Tabla 4-5 Variación del volumen de almacenamiento de agua en el humedal Ciénaga Colombia

La zona de captura del humedal Ciénaga Colombia fue definida a partir del análisis y superposición de las superficies piezométricas promedio (mensuales, anual y de verano e invierno) con la divisoria superficial de la cuenca de la quebrada Ciénaga, como principal tributario del humedal Ciénaga Colombia.

Producto de este ejercicio, se identificó que dicha área está constituida por la unión de la cuenca subterránea y la cuenca superficial. Donde la divisoria subterránea en la dirección NW se aproxima a la divisoria superficial que separa las cuencas del río Man y del río San Jorge en límites con el departamento de Córdoba, y la divisoria hacia el Sur, oscila alejándose o entrando en la cuenca superficial según la variación de los escenarios hidrológicos a través del los ciclos anuales (Figura 4-11).

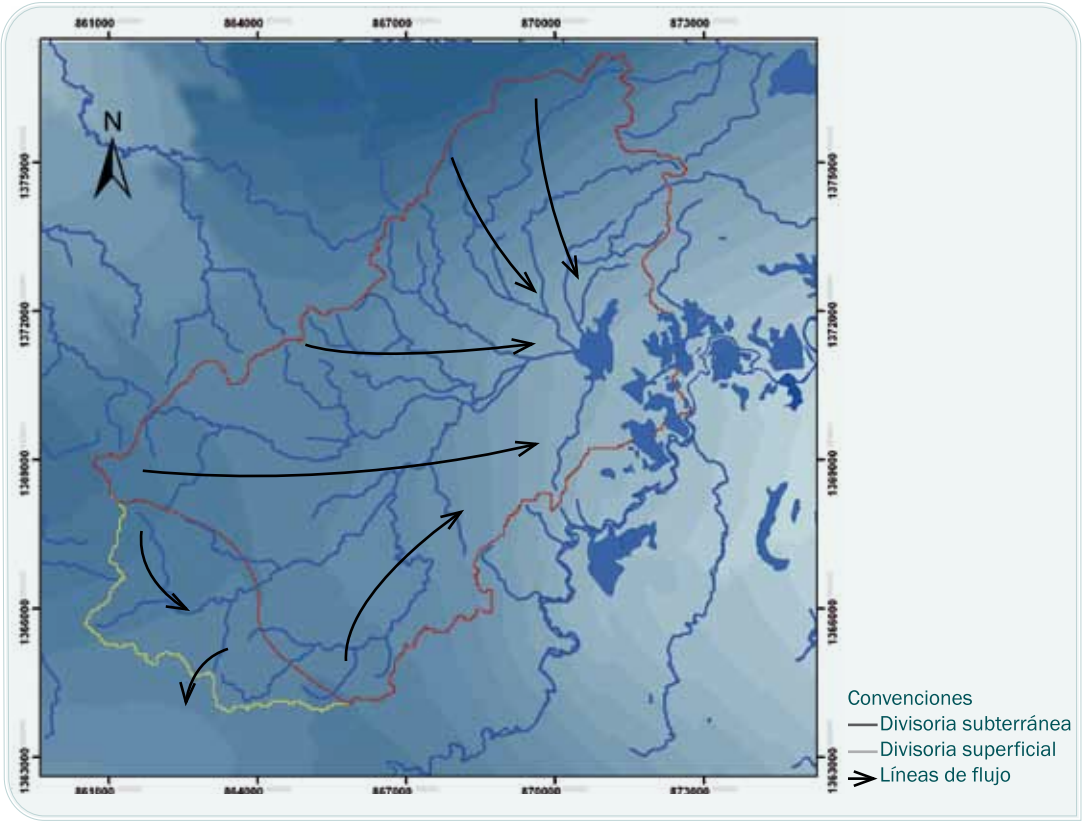
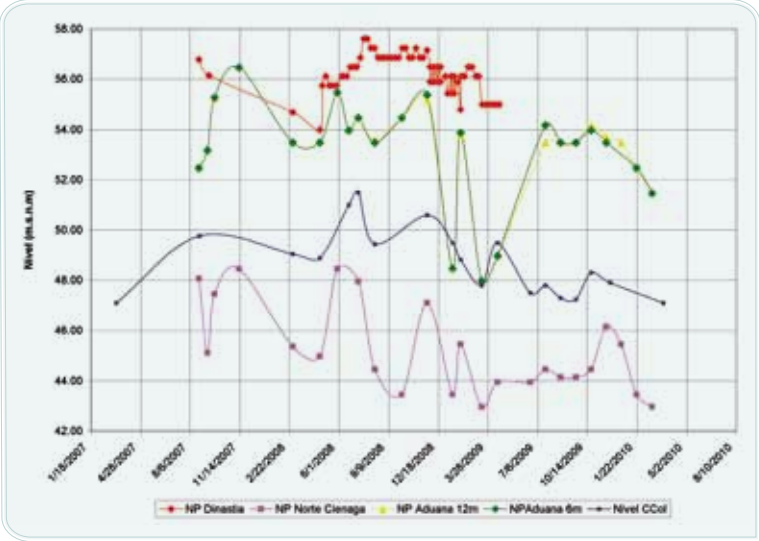


Figura 4-11 Delimitación de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia

Si se tiene en cuenta cada una de las observaciones y mediciones realizadas en las ocho campañas de monitoreo de campo, llevadas a cabo durante el periodo comprendido entre agosto de 2007 y marzo de 2010, incluyendo las jornadas de reconocimiento en Marzo y Agosto de 2007; son muchos los elementos hidrológicos e hidráulicos que permiten clasificar al humedal Ciénaga Colombia, como un humedal dependiente de las aguas subterráneas (Custodio, 2001), donde el nivel freático y la franja capilar están a poca profundidad permitiendo la supervivencia de la flora y la fauna nativa; favoreciendo una gran diversidad de formas y características bioquímicas que tienen importantes implicaciones en la diversidad y productividad ecosistémica.

Las variaciones de nivel en el humedal entre la época de verano e invierno, su estrecha relación con la dinámica mensual de los niveles piezométricos cercanos



(Figura 4-12) y las correspondientes líneas de flujo para el acuífero libre, indican una clara y constante interconexión de las aguas subterráneas con algunas corrientes superficiales y especialmente con el humedal Ciénaga Colombia. El humedal Ciénaga Colombia es un humedal dependiente de las aguas subterráneas (Registro fotográfico 4-2).

Figura 4-12 Relación entre el nivel de agua del humedal y los piezómetros cercano

Verano (Marzo 2007)

Invierno (Abril 2008)

Huellas de inundación

Lecho Ciénaga – Grietas de desecación.

Registro fotográfico 4-2 Características hidrológicas del humedal Ciénaga Colombia

4.1.3. Clima

En general un clima cálido-húmedo se registra en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia con una precipitación promedio anual multianual del orden de 2600 mm y una temperatura promedio de 28°C, de acuerdo con los registros históricos del Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM (Universidad de Antioquia, 2008).

Las diferentes clasificaciones del clima aplicadas en Colombia (Tabla 4-6); todas basadas en el comportamiento medio de la precipitación y la temperatura principalmente, configuran un conjunto de circunstancias que imprimen a la zona un patrón climático homogéneo al que se le aplicaría según Köeppen, la denominación de tropical lluvioso de selva o según Holdridge cálido húmedo (IDEAM, 2005).

Además de los factores globales que inciden en el clima, la localización del Bajo Cauca antioqueño en las últimas estribaciones de las cordilleras Occidental y Central de los Andes colombianos, en el pie de monte que constituye la puerta de entrada a la región Caribe le imprime a la dinámica climatológica una complejidad especial que se ve reflejada en las amplias variaciones que a lo largo del año se registran en los fenómenos de lluvia y escorrentía (Betancur, 2008).

Clasificación	Tipo de clima	Símbolo
Agroclimática de Thornthwaitte	Moderadamente húmedo (Exceso de 1.000 a 1.500 mm/año)	NA
Koeppen	Tropical lluvioso de selva	Af
Caldas	Cálido	C
Lang	Húmedo	H
Martone	Húmedo lluvioso	B
Holdridge	Cálido Húmedo	Bh-T

NA: No aplica

Tabla 4-6 Clasificación del clima para la zona de captura de Ciénaga Colombia

4.1.4. Edafología

De acuerdo con el IGAC (1979), los tipos de suelo identificados en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia (Figura 4-13) pertenecen a las asociaciones Samán (SHa), Tarazá (TRa), Lago (L) y Margarita (GMbc1-2). En la tabla 4-7 se resume su granulometría y propiedades físicas, a partir de las cuales fue posible obtener el promedio ponderado de la capacidad de campo (122 mm) y el punto de marchitez (8,4 mm) para la zona de estudio.

Asociación	% de Gruesos	% de Finos	Capacidad de Campo (cm^3 agua/cm^3 suelo)	Punto de marchitez (cm^3 agua/cm^3 suelo)
Margarita	46,86	52,61	0,31	0,20
Tarazá	40,75	59,25	0,28	0,15
Samán	19,8	80,13	0,34	0,18

(Estimado a partir de Estudio de Suelos del Departamento de Antioquia, 1979)

Tabla 4-7 Capacidad de campo y punto de marchitez por asociación de suelo

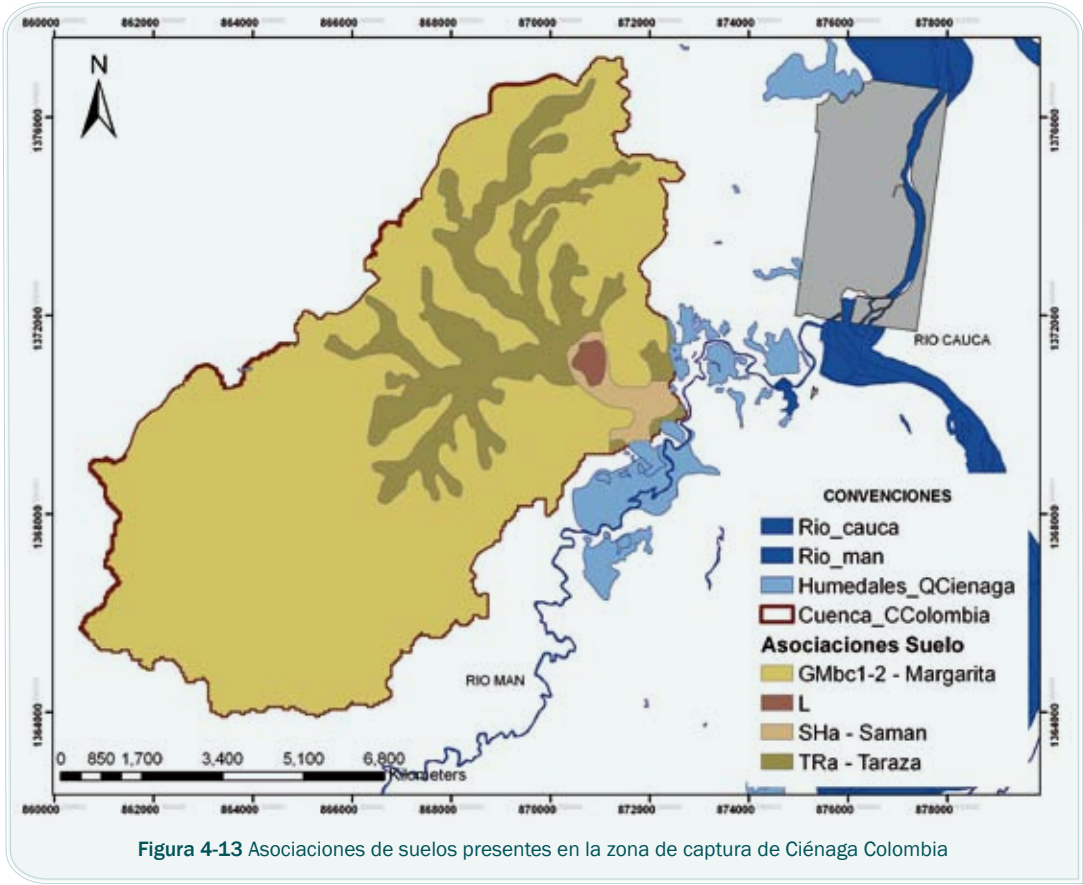


Figura 4-13 Asociaciones de suelos presentes en la zona de captura de Ciénaga Colombia

4.1.5. Geología

De acuerdo con los mapas geológicos de Antioquia (González, 1996) a escala 1:400.000 y de Córdoba (González y Londoño, 2001) a escala 1:250.000, las rocas presentes en el Bajo Cauca corresponden a un basamento ígneo y metamórfico sobre el cual reposan unidades litológicas constituidas por rocas y depósitos sedimentarios de edades Terciario y Cuaternario. En particular para el Bajo Cauca antioqueño los trabajos a escala 1:100.000 de Zapata y Cossio (1997) y 1:25.000 de CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia (2003, 2004 y 2005) proporcionan nuevos elementos e interpretaciones de la geología local, los cuales fueron sintetizados por Betancur (2008).

La Formación Cerrito, descrita en la cuenca del río San Jorge (límite con la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en la dirección Noroeste y Suroeste de la cuenca), está dividida en tres miembros: Miembro Superior, areno-arcilloso, con niveles de arenitas calcáreas fosilíferas y algunos mantos de carbón, registra espesores hasta de 300 m (Registro fotográfico 4-3); Miembro Medio, principalmente limo-arcilloso con capas de arenitas calcáreas fosilíferas hacia la parte media, presenta mantos de carbón y espesores que alcanzan 850 m; Miembro Inferior, conformado por areniscas, conglomerados y calizas, se caracteriza por la ausencia de mantos de carbón y posee un espesor de 400 m. En general los clastos de areniscas y conglomerados son 90% silicios y el cemento dolomítico. El ambiente de la Formación Cerrito, según sus características litológicas, es de marino somero a continental, con predominio de ambiente continental, evidenciado por la presencia de mantos de carbón (Betancur, 2008).

En su extremo NE, cerca a la zona del humedal se registran algunas terrazas recientes formadas por la dinámica sedimentaria de los ríos Man y Cauca (Figura 4-14).

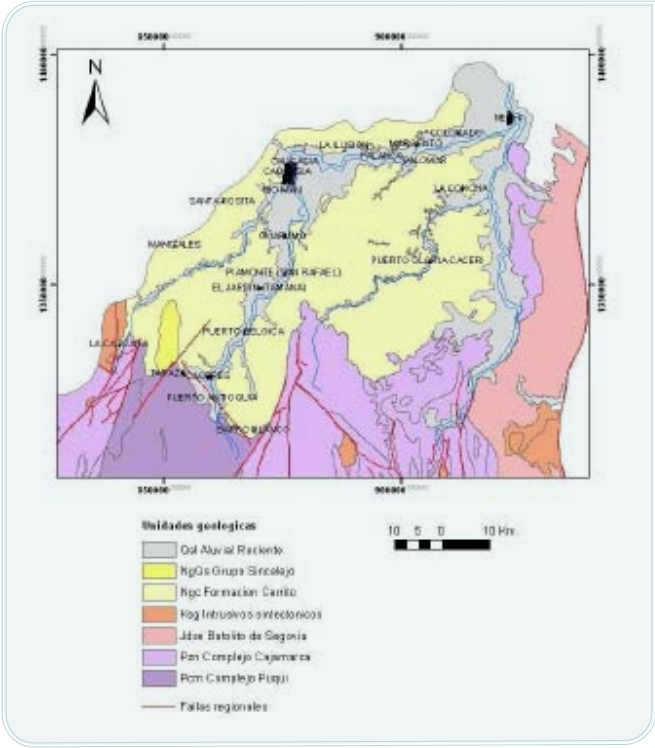


Figura 4-14 Mapa geológico del área de estudio

Registro fotográfico 4-3 Formación Cerrito aflorando en el noroeste del humedal Ciénaga Colombia -sector Aduana-

4.1.6 Unidades hidrogeológicas

De acuerdo a las exploraciones hidrogeológicas y estudios realizados por la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2003, 2004, 2005 y 2006) y al ensamble y síntesis llevados a cabo por Mejía (2006) y Mejía et al. (2007), el sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño está conformado por tres unidades hidrogeológicas, son ellas la unidad hidrogeológica U_{123} que tiene el carácter de acuífero libre y está asociada a los depósitos aluviales recientes y al miembro Superior de la Formación sedimentaria Cerrito, la unidad U_4 que constituye un acuitardo -Miembro Medio de la Formación Cerrito-, y U_5 un acuífero confinado asociado al miembro inferior de la Formación Cerrito. Su distribución espacial y en profundidad se presenta en el mapa de la figura 4-15.

La unidad hidrogeológica de mayor relevancia en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia es el acuífero libre, U_{123}, con espesores que oscilan entre 10 y 50 m y con conductividades horizontales entre 1 y 2 m/d ($K_x = K_y$) y conductividad vertical del orden de 0,02 m/d (K_z). En el noroeste de la zona de captura aflora la unidad hidrogeológica, U_4, la cual también hace parte del modelo hidrológico conceptual. A partir de un ejercicio de modelación numérica regional (Betancur, 2008) fue posible identificar una interconexión vertical por goteo con la unidad U_{123}.

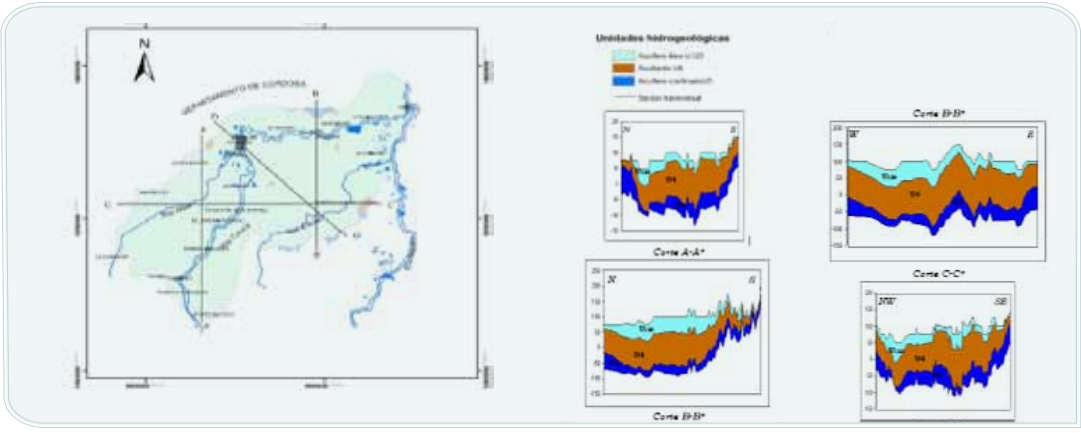


Figura 4-15 Mapa hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño (Betancur, 2008)

4.2. Procesos hidrológicos y balance hídrico

4.2.1. Precipitación

A partir de la información suministrada por el Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y la obtenida a través de la red de pluviómetros instalados para este proyecto, fue posible identificar para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia una distribución estacional de la precipitación con régimen monomodal, con un período seco entre diciembre y marzo y condiciones húmedas entre abril y noviembre (Figura 4-16 y Tabla 4-8).

ESTACIÓN	CAUCASIA	GUARUMO-LA LUCHA	CACAOTERAS DEL DIQUE	H. LA CANDELARIA SANTA ROSITA	H. LA CANDELARIA UDEA
CÓDIGO	2502139	2624010	2625504	LG-001	
PERIODO DE REGISTRO	1969-2004	1970-2008	1969-2008	1995-2008	2007-2008
ENERO	27,6	39	27,8	22,5	0
FEBRERO	32	39,6	31,6	26,1	16
MARZO	74,7	74,1	75,3	68,6	91,8
ABRIL	203,6	214,2	230,7	174,6	280,5
MAYO	251,2	316,3	286,1	305,5	172,5
JUNIO	345,3	347,9	346,2	363,8	338,5
JULIO	336,8	352,6	370	323,7	291,5
AGOSTO	380,8	392,5	380,4	343,1	480,5
SEPTIEMBRE	348,9	357,4	335,9	301,7	269
OCTUBRE	317,5	353	322,9	366	370
NOVIEMBRE	213,6	239,6	237,9	204,4	190
DICIEMBRE	84,9	117,8	94,9	99,4	126
TOTAL	2616,9	2844	2739,7	2599,4	2626,3

Fuente: IDEAM – Red monitoreo

Tabla 4-8 Registros de precipitación promedia mensual multianual (mm) de las estaciones con mayor influencia en la zona de estudio

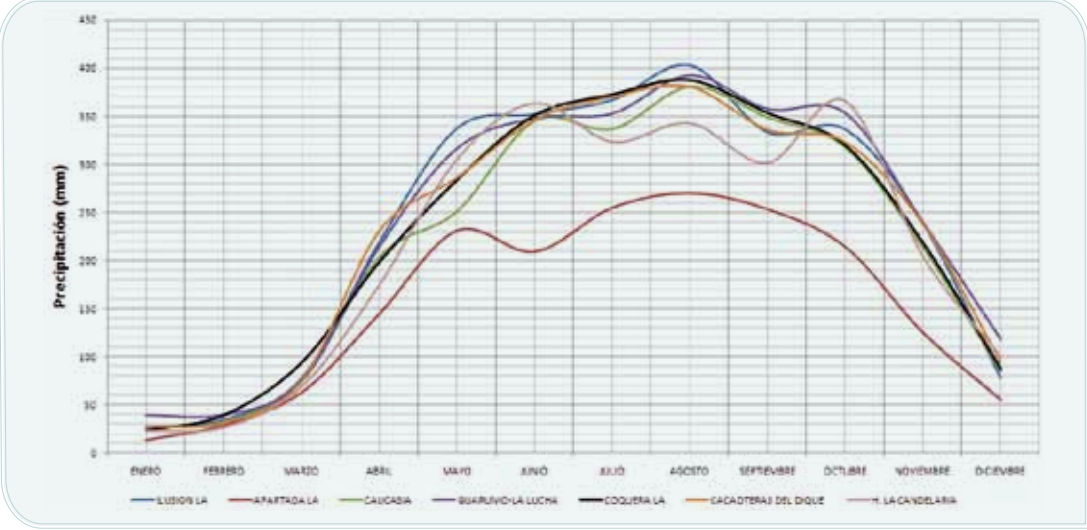


Figura 4-16 Distribución de la precipitación en la zona de captura de Ciénaga Colombia

El comportamiento de la precipitación durante el periodo enero 2007 – noviembre 2008[2], coincide de manera general con la tendencia hidrológica de la zona: una distribución monomodal con un periodo seco entre diciembre y marzo y un periodo de lluvia entre abril y noviembre, sin embargo algunas diferencias relevantes merecen ser tenidas en consideración: i) durante el año 2007 los meses más lluviosos fueron junio y agosto, registrándose valores de precipitación por encima de los promedios multianuales, ii) el año 2008 en comparación con el 2007 fue más lluvioso, con altos pluviométricos en los meses de septiembre y octubre que superan ampliamente el promedio multianual y con un acumulado hasta el mes de noviembre, que excede en más de 350 mm la lluvia total del año anterior (Tabla 4-9 y Figura 4-17).

PERIODO	Hda. La Candelaria UdeA		Hda. La Candelaria Santa Rosita		
	2007	2008	2007	2008	Multianual (95-08)
ENERO	0	0	0	0	22,5
FEBRERO	4	28	0	0	26,1
MARZO	122,5	61	113	48	68,6
ABRIL	233	328	294	190	174,6
MAYO	111	234	147	427	305,5
JUNIO	420	257	537	499	363,8
JULIO	216	367	268	433	323,7
AGOSTO	588	373	613	468	343,1
SEPTIEMBRE	225	313	316	517	301,7
OCTUBRE	285	455	339	413	366
NOVIEMBRE	190	NR	47	123	204,4
DICIEMBRE	126	NR	81	NR	99,4
TOTAL	**2.520**	-	**2.755**	-	**2.599**

Tabla 4-9 Precipitación mensual (mm) registrada durante los años 2007 y 2008 en dos estaciones de observación

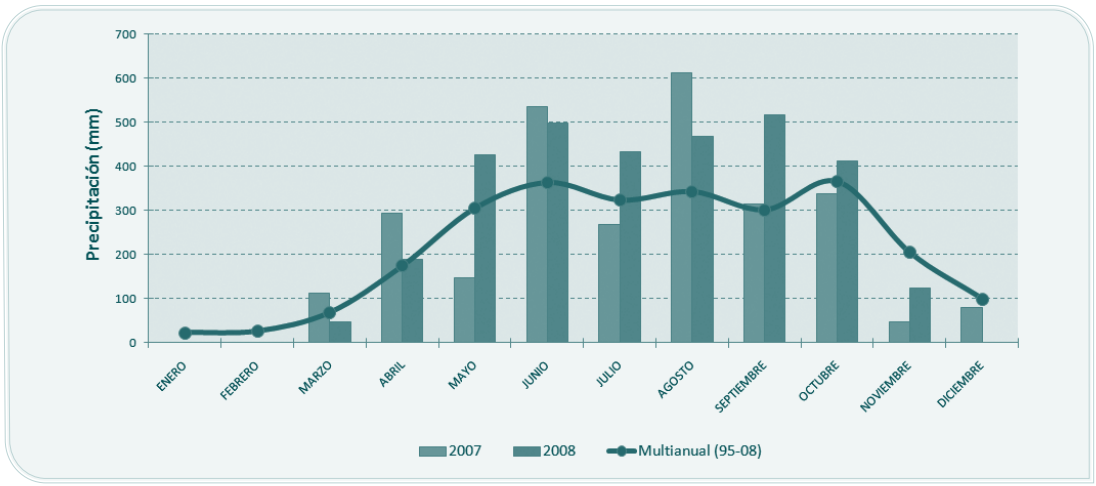


Figura 4-17 Comportamiento de la precipitación en la hacienda La Candelaria

2 Periodos con información disponible.

Estimaciones de la distribución promedia mensual multianual de la precipitación en la zona de captura de Ciénaga Colombia, evidencian la presencia de un gradiente descendente en la dirección suroeste – noroeste (Tabla 4-10 y Figura 4-18).

PMMM Cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	26,7	37,3	76	181,1	284,9	326,9	325,8	356,1	320,2	296,5	196	89,4	2.517
Mínimo	22,3	32	70,8	170,7	242,8	285,8	298,2	330,1	301,8	268,9	173,9	74,1	-
Máximo	32,1	41,2	87	192,2	311	362,8	360,4	378,6	341,3	322,2	215,8	105,3	-
Rango	9,8	9,3	16,2	21,5	68,1	76,9	62,2	48,5	39,5	53,3	41,9	31,3	-
Desviación	2,4	1,6	3,5	5,2	15,7	17,7	11	10,8	8,5	12,1	9,6	7,1	-

Tabla 4-10 Rangos de precipitación promedio mensual multianual en la zona de captura

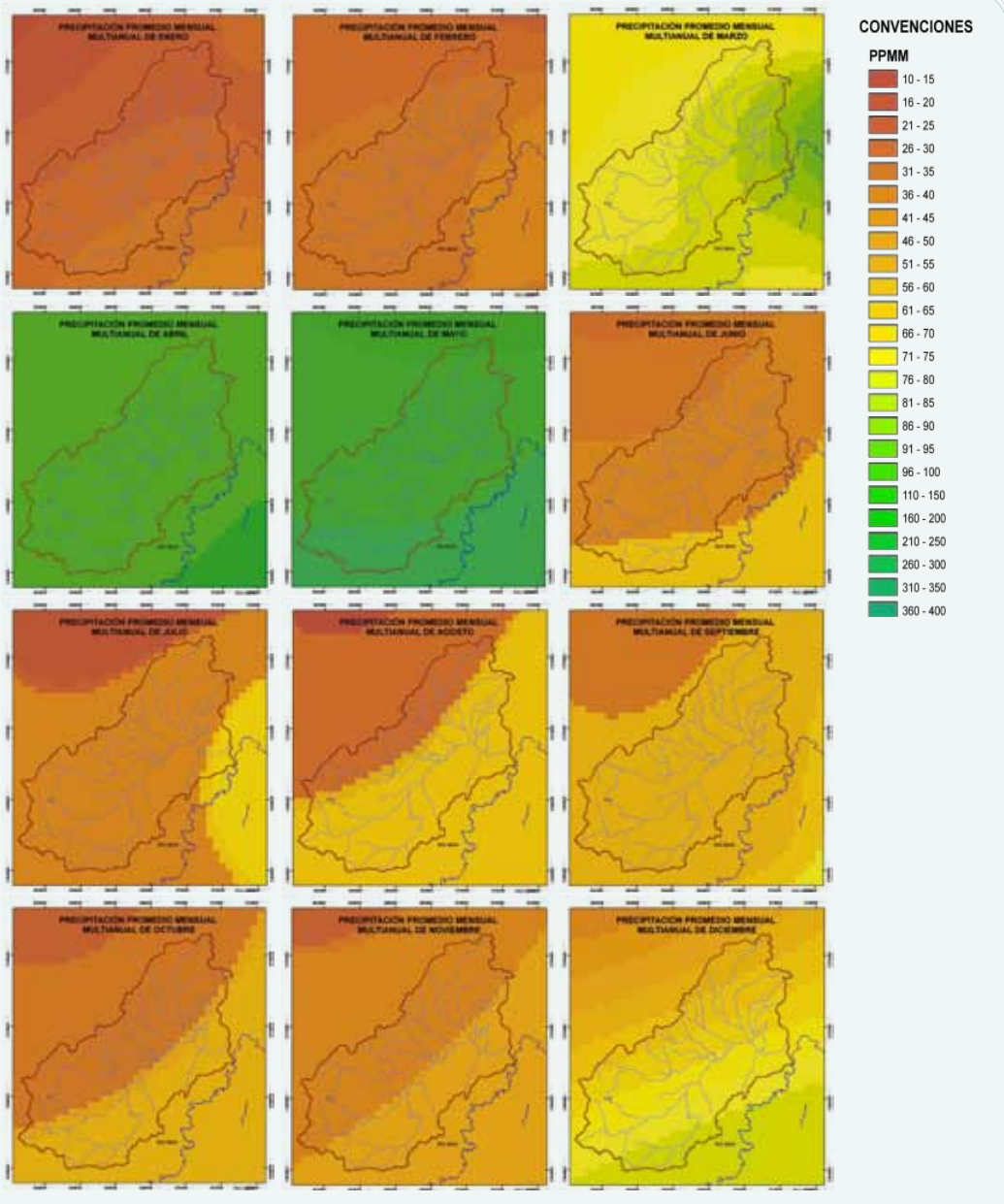


Figura 4-18 Isoyetas de precipitación promedio mensual multianual (mm) - zona de captura Ciénaga Colombia

4.2.2. Temperatura

Según la Universidad de Antioquia y CORANTIOQUIA (2004) en el Bajo Cauca antioqueño, conforme con su posición ecuatorial, las variaciones estacionales de la temperatura son poco significativas. El promedio multianual, según datos de la estación Cacaoteras del Dique (Tabla 4-11), es de 27,9°C. El menor valor se obtiene para el mes de enero (27,4°C), mientras que el máximo corresponde al mes de marzo (28,7°C). En la Figura 4-19 se puede apreciar un incremento anual en la temperatura promedio mensual desde el año 1969 hasta el año 2008.

Registro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
promedio	27,4	28,3	28,7	28,4	28,1	28	28,1	28	27,5	27,5	27,6	27,6	27,9
Máximo multianual	29,7	29,5	30,6	29,5	29,3	29,1	29,5	29,5	28,7	29	29	29,2	29,4
Mínimo multianual	21,2	26,8	27,7	27,5	27	26,8	26,8	26,6	26	26,3	26,5	26,1	26,3
Rango	8,5	2,7	2,9	2	2,3	2,3	2,7	2,9	2,7	2,7	2,5	3,1	

Tabla 4-11 Registros de temperatura media mensual multianual - Estación Cacaoteras del Dique

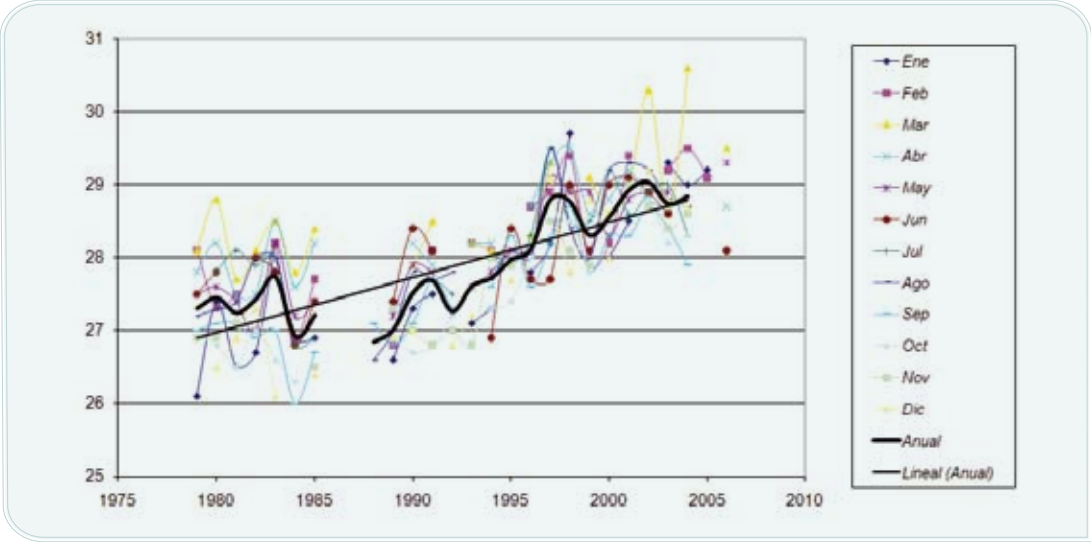


Figura 4-19 Variación mensual anual de la temperatura (°C) en la estación Cacaoteras del Dique

4.2.3. Evapotranspiración

Para la estimación de la evapotranspiración potencial y real en la zona de estudio, se emplearon los registros de evaporación en tanque de la estación climatológica Cacaoteras del Dique, de la cual se tiene información común para el periodo de registro comprendido entre los años 1979 y 2008.

Los valores promedio mensual multianual de esta estación se compararon con estimativos de la evapotranspiración calculada a partir de relaciones teóricas que se

documentan en la tabla 4-12. Los resultados pueden observarse en la figura 4-20, de la cual se concluye, que la distribución de la evapotranspiración real que más se ajusta a las condiciones de la zona de estudio (Estación Cacaoteras del Dique) es la calculada a partir de la ecuación de Budyko con Cenicafé, obteniéndose un valor promedio de anual de 1.206 mm.

Periodo	Evapotranspiración potencial (mm/mes)			Evapotranspiración real (mm/mes)			Estación Cacaoteras del Dique ETP (mm/mes)
	Cenicafé	Thornthwaite	García y Lopez	Budyko (cenicafé)	Budyko (Thornthwaite)	Budyko (García y López)	
Enero	28	148,87	150,75	20,69	20,7	20,7	117,58
Febrero	129	169,48	150,37	34,45	34,94	34,77	122,88
Marzo	142,82	179,82	169,42	69,85	73,71	72,81	136,48
Abril	138,21	172,85	156,62	116,94	137,31	128,26	117,14
Mayo	142,82	164,75	152,6	125,57	140,89	132,57	110,65
Junio	138,21	163,48	146,37	124,6	143,75	130,94	106,65
Julio	142,82	165,21	153,94	130,23	147,98	139,16	121,39
Agosto	142,82	162,07	151,76	129,66	144,75	136,76	121,12
Septiembre	138,21	151,73	141,33	124,86	135,36	127,32	110,35
Octubre	142,82	149,8	144,83	127,87	133,2	129,42	101,61
Noviembre	138,21	153,74	142,21	117,97	127,89	120,6	97
Diciembre	142,82	152,96	148,67	82,9	84,96	84,12	98,11
TOTAL	**1681,6**	**1934,8**	**1808,9**	**1205,6**	**1325,4**	**1257,4**	**1361,0**

Tabla 4-12 Estimación de la evapotranspiración promedia mensual multianual empleando las información de la estación climatológica Cacaoteras del Dique

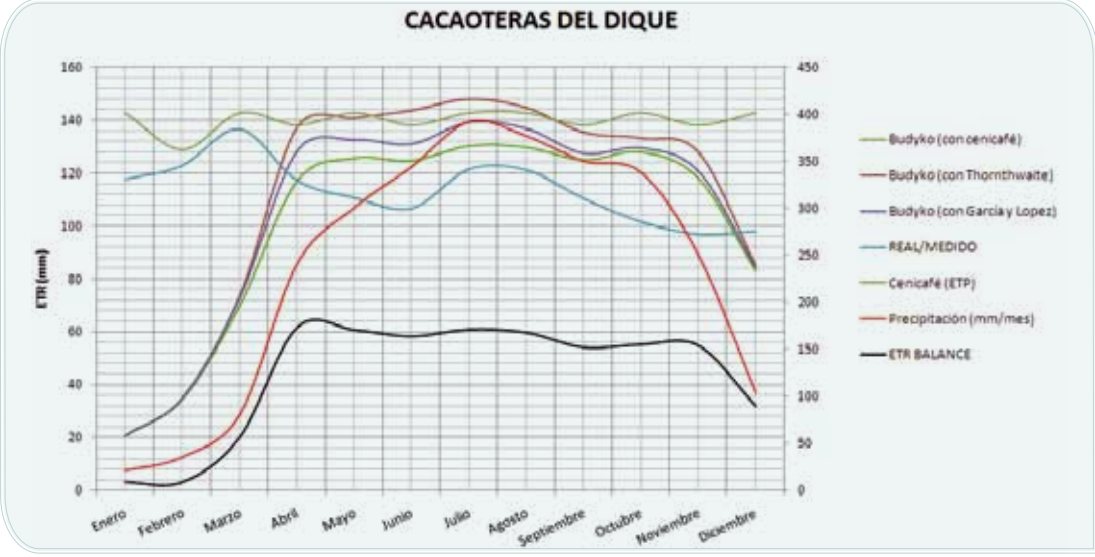


Figura 4-20 Estimación de la evapotranspiración real por diferentes métodos

4.2.4. Estimación y distribución de la recarga

Para la estimación de la recarga se empleó la técnica física conocida como método de la fluctuación del nivel freático – WTF- (Healy y Cook, 2002), cual se basa en la premisa que el aumento de los niveles de agua subterránea en acuíferos no confinados se debe al agua de recarga que alcanza el nivel freático. La recarga es calculada de acuerdo con la ecuación 4-1.

$$R = S_Y \frac{\delta h}{\delta t} = S_Y \frac{\Delta h}{\Delta t} \qquad \text{Ec. 4-1}$$

Donde S_Y es la capacidad específica de la unidad, h la altura del nivel freático y t el tiempo.

Este método se aplica mejor sobre periodos de tiempo cortos y en regiones con niveles freáticos poco profundos, donde el análisis de las fluctuaciones también puede ser útil para determinar la magnitud de los cambios a largo plazo en la recarga causados por el clima o cambios en el uso del suelo.

Las dificultades en la aplicación del método están relacionadas con la determinación de un valor representativo para S_Y, el cual se asume constante durante el periodo de fluctuaciones, aunque se tiene evidencia de que este varía con la profundidad (Childs, 1960). Para el caso de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, fueron analizados los resultados aplicando los rangos de S_Y documentados en la literatura según la geología de cada unidad (Johnson, 1967 en Custodio, 1997; Healy y Cook, 2002); teniendo en cuenta que para un acuífero libre el coeficiente de almacenamiento (S) es próximo a la porosidad efectiva o capacidad especifica (S_Y) y que regionalmente, se tiene un estimativo de 0,1 (Betancur, 2008). Este valor está acorde con valores obtenidos mediante pruebas realizadas en U_{123} y U_4 (UdeA-Corantioquia, 2004). Adicionalmente, se debe asegurar que las fluctuaciones en los niveles del agua se deben a la recarga y que no son el resultado de cambios en la presión atmosférica, la presencia de aire atrapado u otro fenómeno como el régimen del bombeo.

Debido a la simplicidad del método y a la disponibilidad de hidrogramas de medición de nivel piezométrico para los puntos de observación, el método WTF se ha utilizado ampliamente durante muchos años (Rasmussen y Andreasen, 1959; Crosbie et al., 2005). Sin embargo, una excelente revisión del método WTF se documenta en Healy y Cook (2002).

Con este método es posible determinar la recarga neta y total para cada punto de observación. En la estimación de la recarga neta se tiene en cuenta la variación en el tiempo entre las medidas de nivel freático y solo se consideran eventos de recarga los valores de cambio de cabeza positivo. Para la estimación de la recarga total, se tiene en cuenta el concepto de curva de recesión para los eventos de recarga y la extrapolación de la tendencia de cada punto individual para los eventos de descarga.

4.2.4.1 Estimación de la recarga neta

El procedimiento de estimación de la recarga mensual neta en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia para el periodo comprendido entre diciembre 2007 y noviembre 2008, se realizó empleando la información piezométrica semanal de varias de las estaciones de monitoreo: Charrascal (GWD-14), Piezómetro Jalisco (GWP-06),

Piezómetro La Candelaria (GWP-01), Buenos Aires (GWD-21), Guarumal (GWD-27), Costa Rica (GWD-02) y Rancho Alegre – La Fortaleza (GWD-11); teniendo en cuenta su influencia en las líneas de flujo subterráneo y su relación con la precipitación y las asociaciones de suelo presentes (Tabla 4-13).

Periodo	RECARGA NETA (mm/mes)						
	Charrascal	Rancho Alegre	Piez. Jalisco	Piez. La Candelaria	Costa Rica	Guarumal	Buenos Aires
Diciembre 2007	2	12	2	111	0	0	29
Enero 2008	0	5	0	0	0	70	0
Febrero 2008	5	8	0	2	7	0	0
Marzo 2008	70	ND	0	0	6	0	0
Abril2 008	136	102	42	12	0	375	320
Mayo 2008	28	106	19	22	36	0	9
Junio 2008	36	22	56	7	20	0	0
Julio 2008	2	14	24	20	22	25	0
Agosto 2008	7	43	30	55	17	0	109
Septiembre 2008	10	13	21	8	15	0	0
Octubre 2008	5	14	14	90	11	0	0
Noviembre 2008	10	11	110	0	11	20	0
Totales	311	350	318	327	145	490	467
% lluvia anual (3178mm)	9,8	11,0	10,0	10,3	4,6	15,4	14,7

ND: No determinado

Tabla 4-13 Estimación mensual de la recarga neta para la zona de captura de Ciénaga Colombia

Al analizar la información de cada estación, teniendo en cuenta su localización geográfica (parte alta o baja de la cuenca), se identifica que la recarga neta en la zona de captura en magnitud sigue la tendencia del gradiente de precipitación descendente desde los limites SE al NW de la cuenca (Figura 4-21), con una magnitud promedio de 344 mm al año, que corresponde al 10,8% de la precipitación promedia anual en la zona de captura para este periodo.

También fueron estimados los valores de descarga mensual (valores negativos de cambio de cabeza piezométrica) para cada estación de monitoreo con el objetivo de cuantificar la relación recarga/descarga del sistema acuífero. Esta información permite inferir la sostenibilidad hidrológica actual de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en términos de las entradas y salidas de flujo subterráneo.

En la tabla 4-14 se pueden observar los resultados que muestran que para las estaciones más representativas en la zona de captura, la relación recarga/descarga se encuentra por encima de la unidad, lo que significa que en la actualidad el acuífero libre no presenta una condición que pueda poner en riesgo su posibilidad de explotación como principal fuente de abastecimiento doméstico para los pobladores ni como la principal fuente de sostenibilidad hídrica del humedal Ciénaga Colombia, dado los aportes que en épocas de estiaje le cede a este sistema.

Estación	Piez. Jalisco	Piez. La Candelaria	Costa Rica	Rancho Alegre
Recarga	318	327	145	350
Descarga	-250	-247	-138	-222
Recarga/Descarga	1,27	1,32	1,05	1,58

Tabla 4-14 Relaciones recarga/descarga para la zona de captura de Ciénaga Colombia

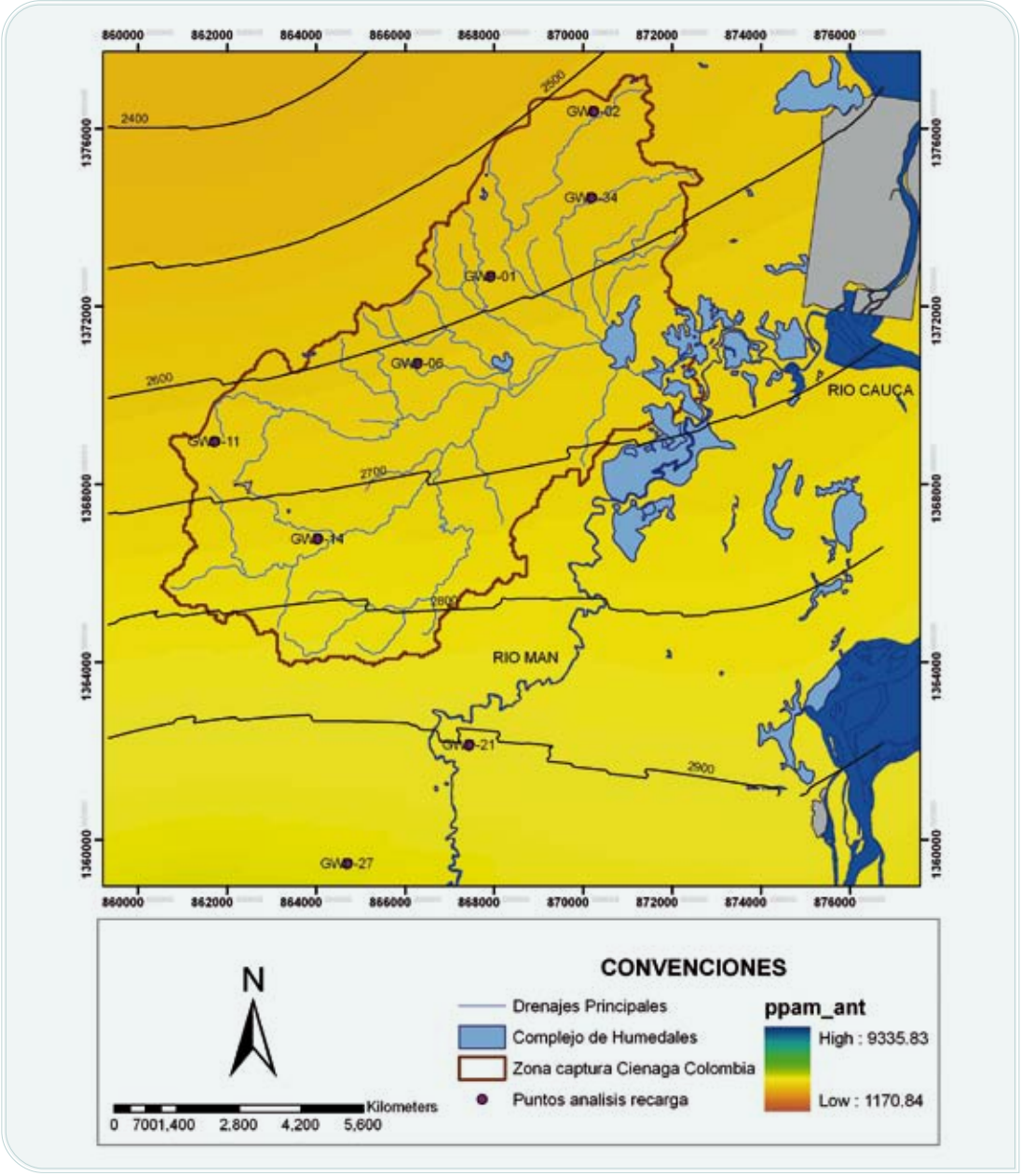
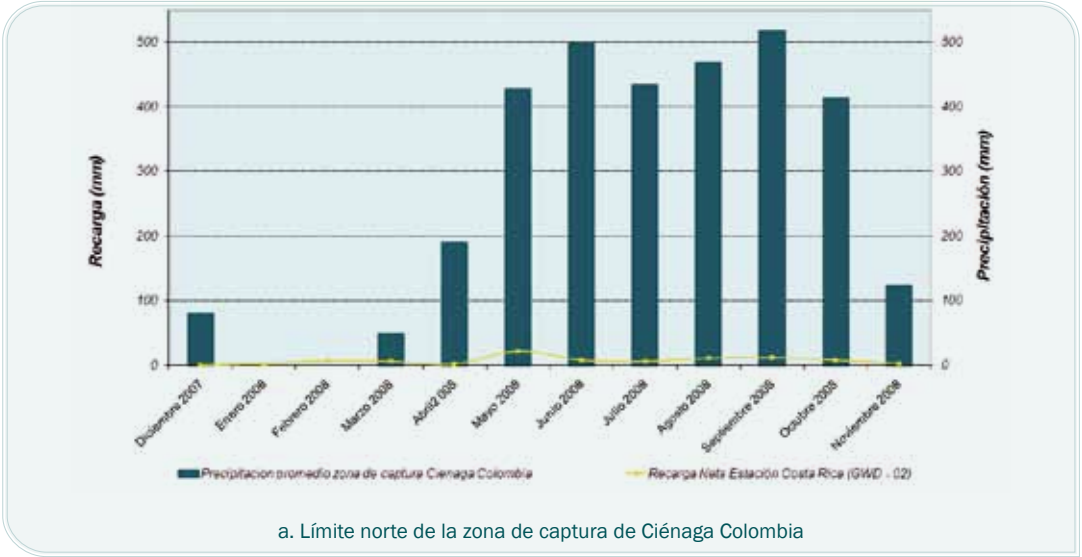


Figura 4-21 Puntos de análisis de recarga

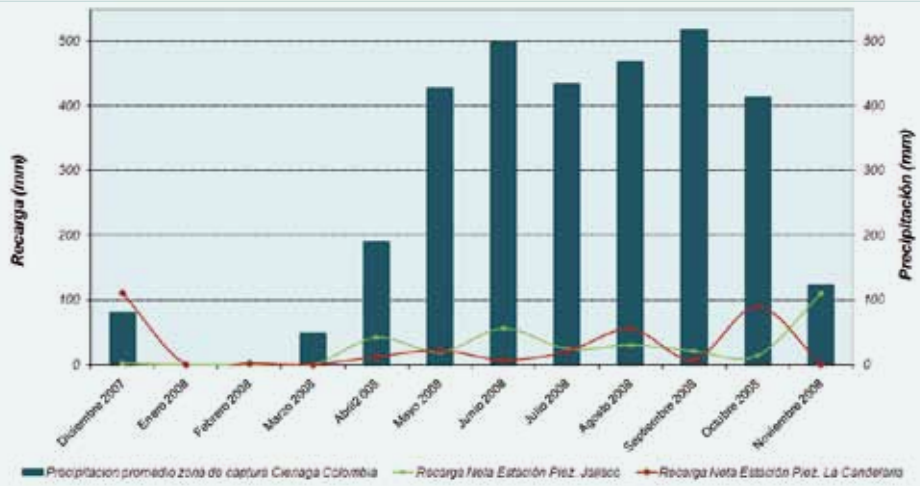
En la figura 4-22 se puede observar la relación precipitación - recarga neta para diferentes sectores de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia. En cada uno de los gráficos se relaciona la precipitación promedio de la cuenca con la estación que espacialmente se encuentra ubicada en los límites norte, noroeste, suroeste y sur de la cuenca.

En el límite norte de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia (Figura 4-22a), se localiza espacialmente la estación Costa Rica, para la cual se identifican condiciones de recarga que son inferiores y correspondientes con la magnitud y dirección del gradiente descendente de la precipitación en el sentido sureste – noroeste de la cuenca. Los valores de recarga comienzan a ser evidentes en el periodo mayo - septiembre, alcanzando un valor máximo de 36 mm en el mes de mayo. En las estaciones piezómetro Jalisco y La Candelaria ubicadas espacialmente en el límite noroeste de la zona de captura (Figura 4-22b), se aprecia una tendencia similar en la recarga, lo cual era de esperarse dada la cercanía de ambas estaciones y las condiciones hidráulicas de la unidad hidrogeológica en este sector. Los valores máximos de recarga, se presentan entre los meses de mayo y octubre. Las diferencias con la estación Charrascal y Rancho Alegre – La Fortaleza en el límite suroeste de la cuenca (Figura 4-22c) recaen sobre el mes de abril, donde se presenta una recarga significativa que deberá ser analizada con mayor detalle en la medida en que se obtenga nueva información a partir de la red de monitoreo. No obstante, se infiere que en esta zona el sistema tiene unas condiciones de permeabilidad que favorecen que una vez se presenten las primeras lluvias, el sistema responda rápidamente, lo cual estaría asociado principalmente a la heterogeneidad propia del medio. Igualmente, la cercanía de estas dos estaciones a las principales corrientes superficiales de la zona de captura, quebrada Ciénaga y quebrada del Medio, respectivamente, favorece el intercambio de aportes superficiales con el medio subterráneo.

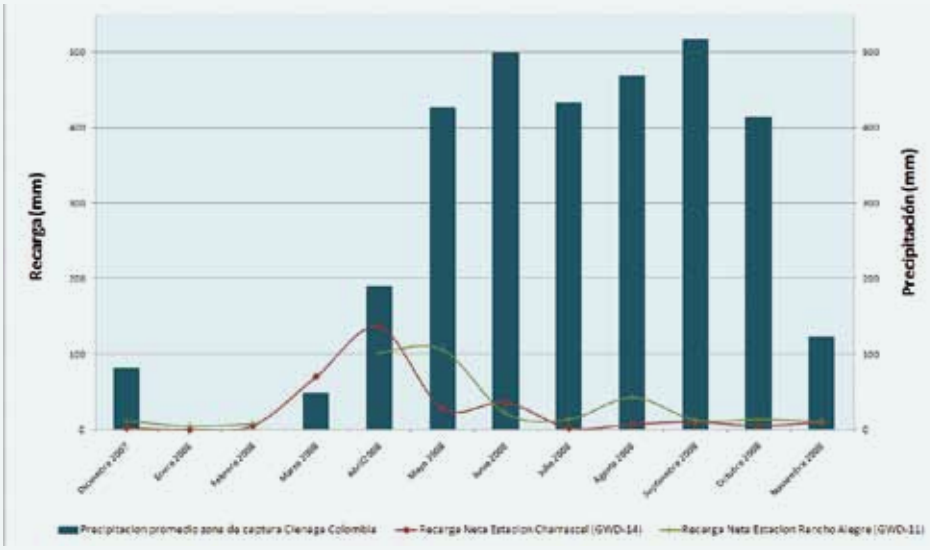
En la zona sur, en los límites de la zona de captura, las estaciones Guarumal y Buenos aires (Figura 4-22d), presentan los mayores registros de recarga en el mes de abril, asociado principalmente a aportes provenientes de flujos regionales desde la cuenca del río Man. En la estación Guarumal se identifican aportes nulos de recarga asociados a eventos de inundación en el mes de mayo, situación similar se presenta en la estación Buenos Aires durante los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En el periodo analizado se presentaron condiciones de alta pluviosidad superiores a los promedios mensuales multianuales.



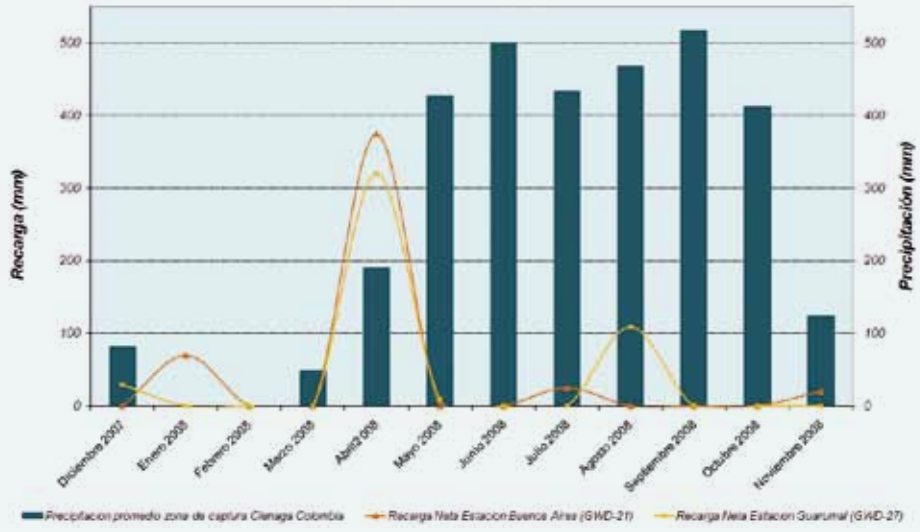
a. Límite norte de la zona de captura de Ciénaga Colombia



b. Límite noroeste de la zona de captura de Ciénaga Colombia



c. Límite suroeste de la zona de captura de Ciénaga Colombia



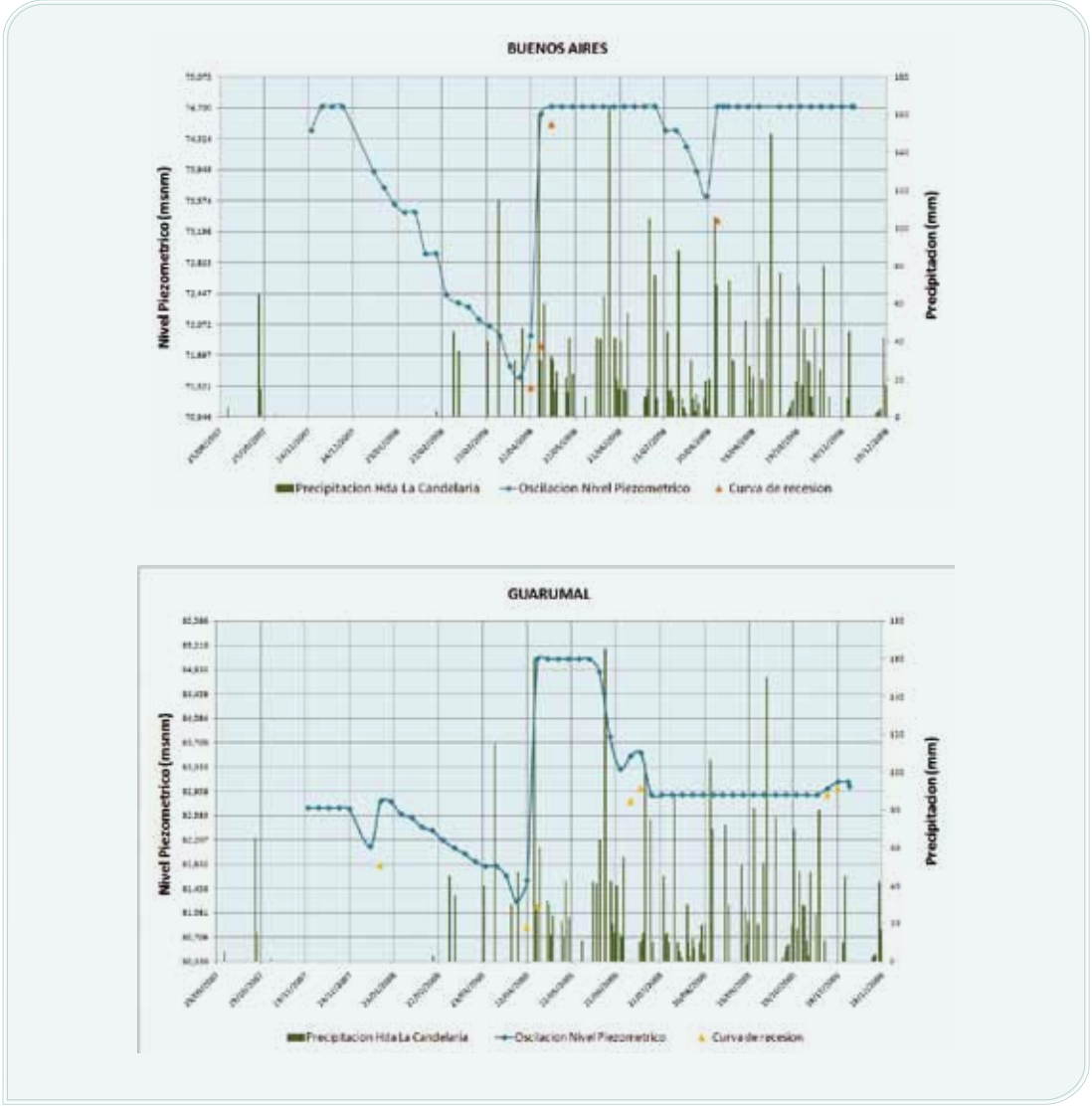
d. Límite sur de la zona de captura de Ciénaga Colombia

Figura 4-22 Relación precipitación vs. recarga neta en la zona de captura de Ciénaga Colombia

4.2.4.2. Estimación de la recarga total

Para cuantificar la recarga total mediante la aplicación del método WTF, se requiere de la aplicación de la ecuación 4.1 tramo a tramo en los intervalos de ascenso individual del nivel freático en el tiempo, complementado, con el análisis de la tendencia individual de cada medición con respecto al valor medido en los eventos de descarga. Para la condición de recarga, Δh se hace igual a la diferencia entre el pico de ascenso y el punto más bajo de la curva de recesión en el momento del ascenso del nivel freático.

Se construyeron las curvas de recesión (Figura 4-23) para los puntos de monitoreo: Charrascal (GWD-14), piezómetro Jalisco (GWP-06), piezómetro La Candelaria (GWP-01), Guarumal (GWD-27) y Buenos Aires (GWD-21).



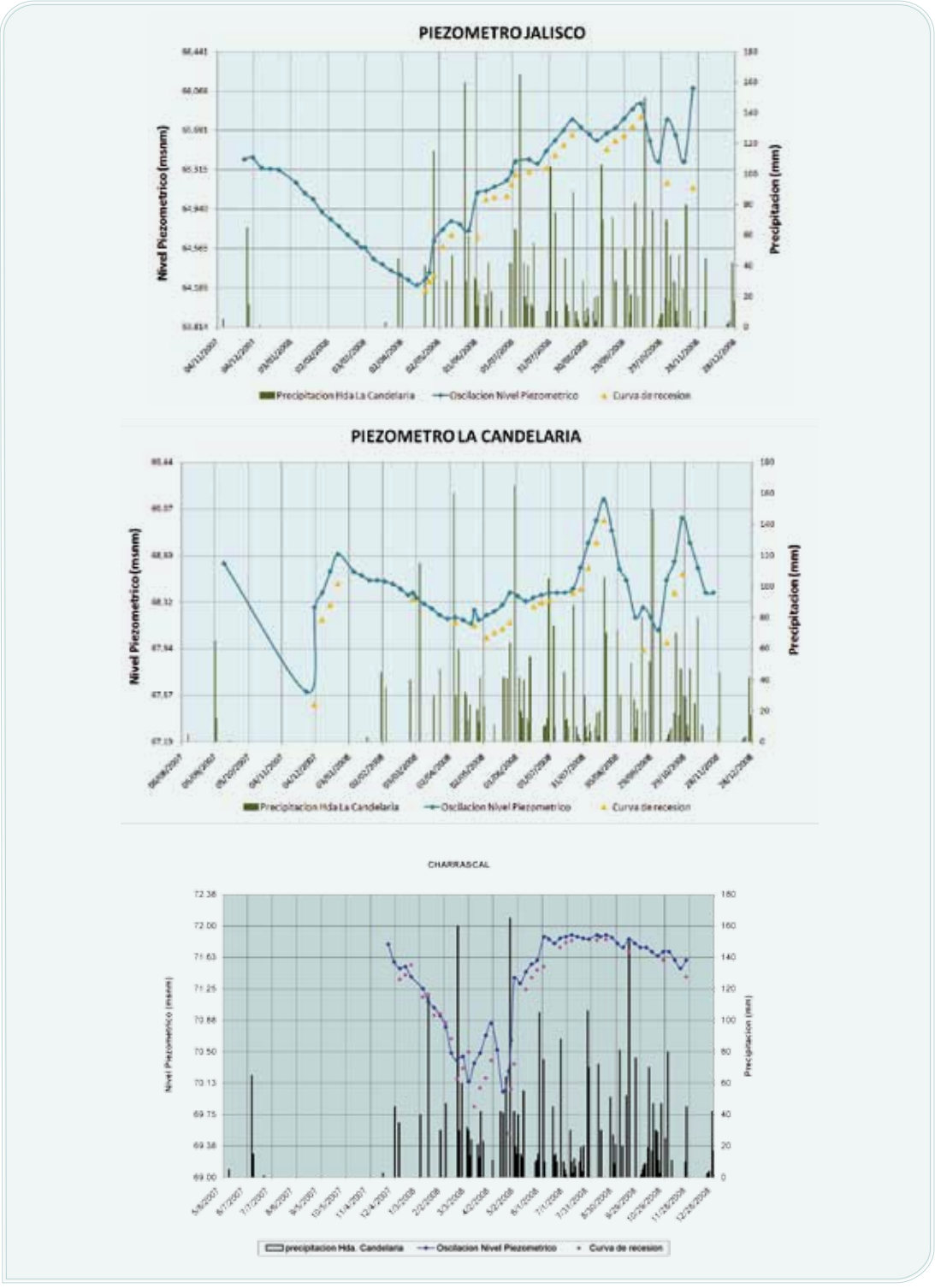


Figura 4-23 Curvas de recesión de nivel piezométrico para la estimación de Dh

En la tabla 4-15 y en figura 4-24 se documentan los resultados de la estimación de la recarga total a escala mensual para cada una de las estaciones analizadas.

Periodo	RECARGA TOTAL (mm/mes)				
	Charrascal	Piez. Jalisco	Piez. Candelaria	Buenos Aires	Guarumal
Diciembre 2007	23	11	150,1	29	0
Enero 2008	19	4	8	16,3	99
Febrero 2008	36	6	4,9	60	25
Marzo 2008	190	11,8	7,3	57,9	11,6
Abril2 008	236	52	16,3	370	462
Mayo 2008	49	29	78	22	0
Junio 2008	54	86	19	0	50
Julio 2008	8	40	20	29	190
Agosto 2008	11,9	42	55	139	0
Septiembre 2008	17	43	51,8	0	0
Octubre 2008	15	43	120	0	0
Noviembre 2008	20	155	20	0	20
Totales	678,9	522,8	550,4	723,2	857,6
% lluvia anual (3178mm)	21,4	16,4	17,3	22,8	27,0

Tabla 4-15 Estimación mensual de la recarga total para la zona de captura de Ciénaga Colombia

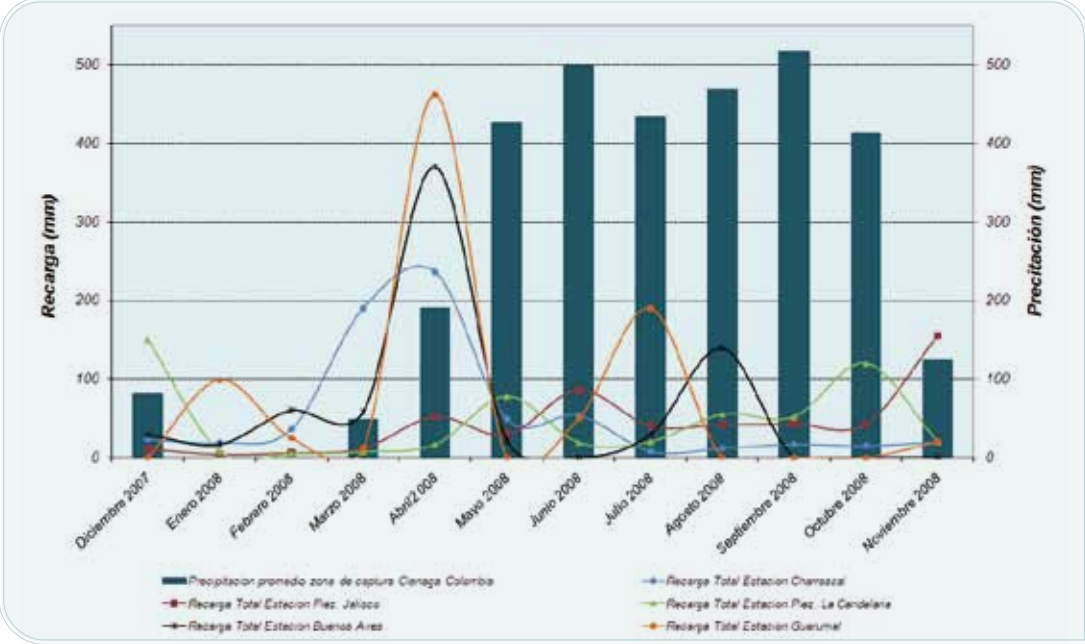


Figura 4-24 Relación precipitación - Recarga total en la zona de captura de Ciénaga Colombia

La recarga total en la zona de estudio para el periodo diciembre 2007- noviembre 2008, presentó una magnitud promedio de 666 mm al año, que corresponde al 21% de la precipitación promedia anual registrada.

Considerando el balance de agua en la cuenca subterránea, para un periodo de tiempo, se cumple que la perdida de agua en la cuenca es equivalente a la ganancia de agua más un cambio en el almacenamiento (Ecuación 4-2).

$$R = \Delta S^{gw} + ET^{gw} + Q_{\text{off}}^{gw} - Q_{\text{on}}^{gw} \qquad \text{Ec. 4-2}$$

Donde, R es la recarga total, ΔS^{gw} es el cambio en el almacenamiento en el acuífero también llamado recarga neta, Q^{bf} es el flujo base, ET^{gw} es la evapotranspiración desde el medio subterráneo y $Q_{off}{}^{gw} - Q_{on}{}^{gw}$ es el flujo subsuperficial neto.

Siguiendo la ecuación anterior y asumiendo que ET^{gw} es aproximadamente cero en el medio subterráneo y que $Q_{off}{}^{gw}$ es aproximadamente igual a $Q_{on}{}^{gw}$; el flujo base (Q^{bf}) puede ser calculado como la diferencia entre la recarga total y la recarga neta ($Q^{bf}=R-\Delta S^{gw}$).

Para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4-16).

Periodo	FLUJO BASE (mm/mes)				
	Charrascal	Piez. Jalisco	Piez. Candelaria	Buenos Aires	Guarumal
Diciembre 2007	21,0	9,0	39,1	0,0	0,0
Enero 2008	19,0	4,0	8,0	16,3	29,0
Febrero 2008	31,0	6,0	2,9	60,0	25,0
Marzo 2008	120,0	11,8	7,3	57,9	11,6
Abril 2008	100,0	10,0	4,3	50,0	87,0
Mayo 2008	21,0	10,0	56,0	13,0	0,0
Junio 2008	18,0	30,0	12,0	0,0	50,0
Julio 2008	6,0	16,0	0,0	29,0	165,0
Agosto 2008	4,9	12,0	0,0	30,0	0,0
Septiembre 2008	7,0	22,0	43,8	0,0	0,0
Octubre 2008	10,0	29,0	30,0	0,0	0,0
Noviembre 2008	10,0	45,0	20,0	0,0	0,0

Tabla 4-16 Estimación del flujo base por el método WTF en la zona de captura de Ciénaga Colombia

Las estaciones en las que se estimaron mas aportes de caudal base en los meses secos son Charrascal y Buenos Aires, lo cual es consistente si se tiene en cuenta la ubicación espacial de estas estaciones con respecto a las corrientes superficiales: quebrada Del Medio y río Man, respectivamente.

4.2.5. Escorrentía

Considerando que sobre ninguno de los tributarios del humedal Ciénaga Colombia (quebrada Ciénaga, quebrada Aduana y caño Ucrania) se cuenta con una estación limnimétrica o limnigráfica que haya registrado valores históricos de nivel (caudal) y además, dadas las características topográficas y las agrestes condiciones del terreno en los sectores a través de los cuales las corrientes de agua superficial ingresan o desaguan la ciénaga, no fue posible realizar aforos y levantar secciones de control para registrar variaciones de nivel en los cauces. Es así como teniendo en cuenta la información de oscilación del nivel piezométrico se calculó la recarga total y apoyados en la ecuación de balance hídrico evaluada a escala mensual, se logró la estimación de los valores de escorrentía directa para el periodo de monitoreo comprendido entre diciembre 2007 – noviembre 2008.

La ecuación de balance hídrico (Ec. 4-3) es una ecuación de conservación de masa en la cual las entradas al sistema, son iguales a las salidas más la variación en el almacenamiento para un intervalo de tiempo conocido:

$$P = Q + ETR + \Delta R \qquad \text{Ec. 4-3}$$

Donde:

P: Precipitación (mm). Representa la cantidad de agua que, por efectos de la fuerza de gravedad, proveniente de la atmósfera alcanza la superficie de la tierra en estado líquido o sólido.

Q: Escorrentía directa (mm). Equivale a la cantidad de agua que proviene de la precipitación y fluye sobre la superficie de la tierra, según las condiciones de pendiente en cada lugar o se mueve subsuperficialmente si el terreno permitió la infiltración.

ETR: Evapotranspiración real (mm). Es la cantidad de agua que en estado de vapor regresa a la atmósfera desde los cuerpos de agua, ya sea desde el suelo (evaporación) o por las plantas (transpiración).

ΔR: Variación en el almacenamiento (mm). Representa las entradas de agua al sistema subterráneo (SS_b), pero también involucra el almacenamiento en el suelo (SS). Es decir que $\Delta R = SS + SS_b$.

Para el cálculo del balance se empleo el método propuesto por Thornthwaite-Mather adaptado a las condiciones de cálculo de la recarga para la zona de estudio, donde según estas consideraciones la escorrentía directa que transita por el sistema ciénaga Colombia equivaldría a:

$$Q = P - (ETR + SS + SS_b) \qquad \text{Ec. 4-4}$$

Los valores de precipitación mensual corresponden a la información promedia para la zona de captura de Ciénaga Colombia, obtenida a partir de la interpolación de los datos de precipitación de las estaciones de la red de monitoreo y del IDEAM en el periodo de análisis; la evapotranspiración potencial fue estimada a partir de los datos históricos de temperatura mensual multianual de la estación climatológica Cacaoteras del Dique, luego la porción de la precipitación que es infiltrada (excedentes hídricos) se acumulan mes a mes hasta conseguir la máxima capacidad de campo, que es función de la textura del suelo y la cobertura vegetal; el espesor de suelo que se considera en este almacenamiento corresponde a la zona no saturada con un valor equivalente a la profundidad de raíces de la asociación predominante en la zona de estudio (asociación Margarita con una profundidad de raíces de 40 cm.). Finalmente, la lámina de agua que consigue pasar este espesor de suelo (zona no saturada) se considera en el modelo como recarga. Este valor en el modelo de balance es un dato de entrada y fue calculado a partir del análisis de las oscilaciones del nivel freático para las estaciones más representativas de la zona de captura: Charrascal, Piezómetro Jalisco y Candelaria, como fue documentado en el aparte 4.2.4 del presente capitulo.

En la figura 4-25 y en la tabla 4-17, se sintetizan los resultados del modelo de balance hídrico aplicado a escala mensual para la estimación de la escorrentía directa en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

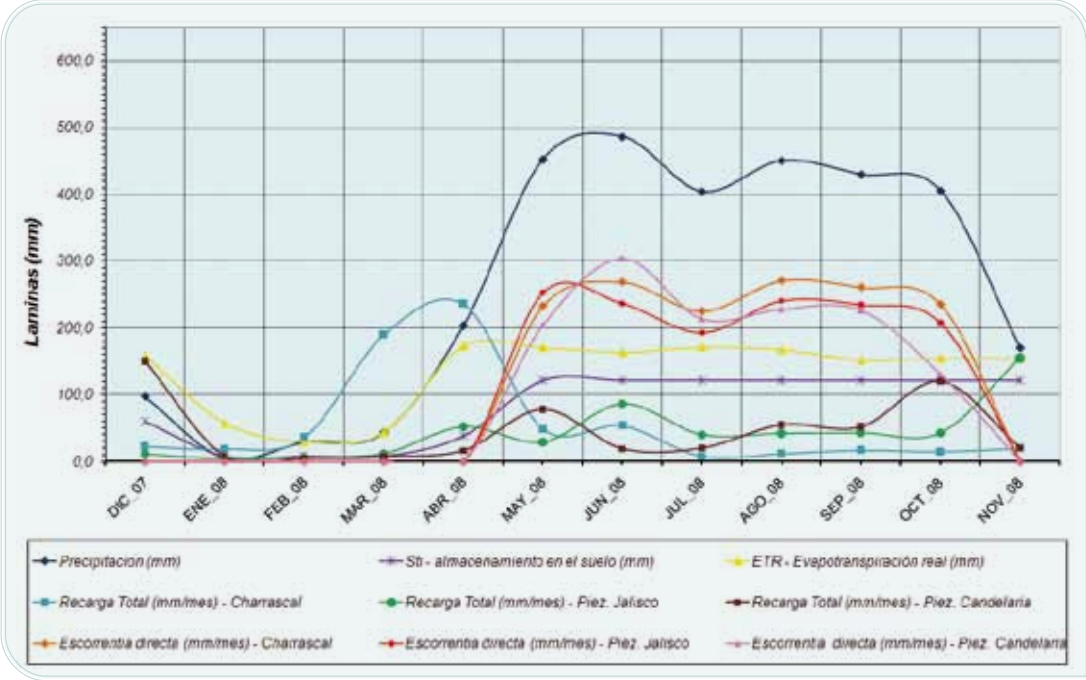


Figura 4-25 Modelo de balance hídrico para la estimación de la escorrentia directa en la zona de captura de Ciénaga Colombia

Variables	DIC 07	ENE 08	FEB 08	MAR 08	ABR 08	MAY 08	JUN 08	JUL 08	AGO 08	SEP 08	OCT 08	NOV 08	ANUAL
Precipitación (mm)	97,3	5,6	29,2	43,4	203,5	452,5	486,6	404,2	450,7	429,9	405,4	169,9	3178
Sti - almacenamiento en el suelo (mm)	60,4	8,4	8,4	8,4	38,7	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0	122,0	978
S - Excedente hídrico (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	159,9	200,8	111,2	160,9	155,9	128,3	0,0	917
ETR - Evapotranspiración real (mm)	158,4	57,6	29,2	43,4	173,2	170,6	163,8	171,1	167,8	152,0	155,1	154,0	1596
D - Déficit hídrico (mm)	0,0	96,5	130,7	142,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	370
Recarga Total (mm/mes) - Charrascal	23,0	19,0	36,0	190,0	236,0	49,0	54,0	8,0	11,9	17,0	15,0	20,0	679
Recarga Total (mm/mes) - Piez. Jalisco	11,0	4,0	6,0	11,8	52,0	29,0	86,0	40,0	42,0	43,0	43,0	155,0	523
Recarga Total (mm/mes) - Piez. Candelaria	150,1	8,0	4,9	7,3	16,3	78,0	19,0	20,0	55,0	51,8	120,0	20,0	550
Escorrentia directa (mm/mes) - Charrascal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	232,9	268,8	225,2	270,9	260,9	235,3	0,0	1494
Escorrentia directa (mm/mes) - Piez. Jalisco	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	252,9	236,8	193,2	240,9	234,9	207,3	0,0	1366
Escorrentia directa (mm/mes) - Piez. Candelaria	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	203,9	303,8	213,2	227,9	226,1	130,3	0,0	1305

Tabla 4-17 Balance hídrico mensual para el periodo diciembre 2007 – noviembre 2008 en la zona de captura de Ciénaga Colombia

En la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en el periodo diciembre 2007- noviembre 2008, se presentó una precipitación total anual de 3.178 mm y una escorrentia promedio estimada de 1.388 mm, mientras que la evapotranspiración real estimada alcanzó un valor neto 1.596 mm. En general en todos los meses se presenta recarga en el sistema. Los maximos valores se presentan selectivamente en algunas zonas de area de estudio con valores de oscilan 4,0 y 236 mm.

Con el objetivo de verificar la consistencia de los resultados obtenidos en la estimación de la escorrentía, estos valores fueron proyectados a caudal (Tabla 4-18 y Figura 4-26) y comparados con las estimaciones obtenidas a partir de algunos intentos de aforo en la corriente de salida – caño Ucrania- (Tabla 4-19 y Figura 4-27) y con la aplicación del Modelo de Administración del Recurso Hídrico – DUBERDICUS desarrollado por Corantioquia en el 2006 (Tabla 4-20).

Caudal (m^3/s)	DIC 07	ENE 08	FEB 08	MAR 08	ABR 08	MAY 08	JUN 08	JUL 08	AGO 08	SEP 08	OCT 08	NOV 08	Promedio anual
Charrascal	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	7,3	8,7	7,1	8,5	8,5	7,4	0,8	4,4
Piez. Jalisco	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	8,0	7,7	6,1	7,6	7,6	6,5	0,8	4,0
Piez. Candelaria	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	6,4	9,9	6,7	7,2	7,3	4,1	0,8	3,9
Promedio	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	7,2	8,8	6,6	7,8	7,8	6,0	0,8	4,1

Nota: Para los meses con escorrentía directa igual a cero según el balance hídrico, se adopta un valor de caudal mínimo de 0,8 m^3/s obtenido con el modelo Duberdicus (Tr=2,33 años).

Tabla 4-18 Valores de caudal mensual (m^3/s) para la zona de captura de Ciénaga Colombia

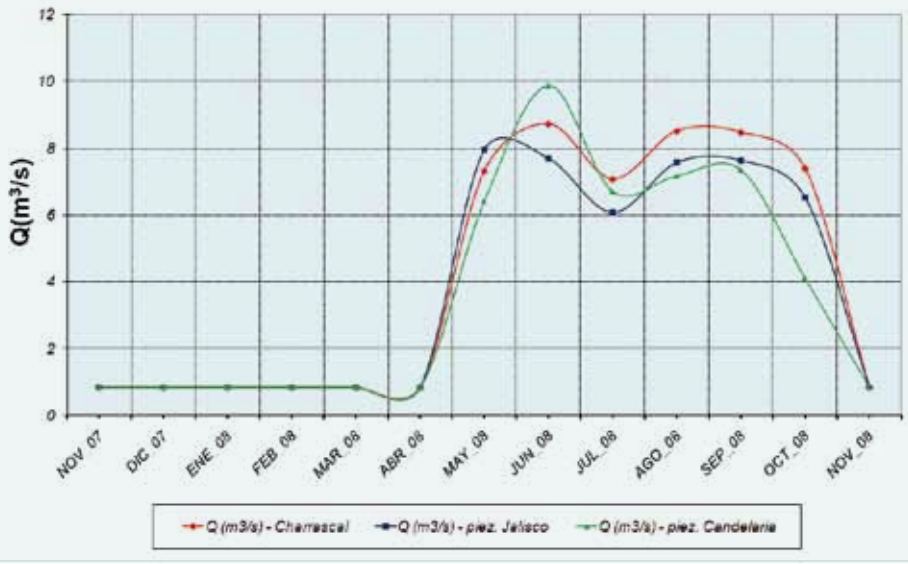


Figura 4-26 Estimación de la distribución de caudales para la zona de captura de Ciénaga Colombia

Estación	0	1	2	3	4	5
Distancia (m)	0	7	14	21	28	35
Profundidad (m)	1,8	1,7	1,6	2,2	2,2	1,4
Áreas (m^2)	0	12,2	11,7	13,4	15,5	0
Rev promedio C 30s	0	55	74	35	4	0
Velocidad (75 cm) (m/s)	0,05	0,1	0,11	0,08	0,05	0,05
Caudal (m^3/s)	0	1,2	1,3	1,1	0,8	0
Caudal total (m^3/s)	4,4					
4415 L/s						

Tabla 4-19 Estimación del caudal promedio instantáneo para el Caño Ucrania a la Salida del Humedal Ciénaga Colombia (Febrero 2008)

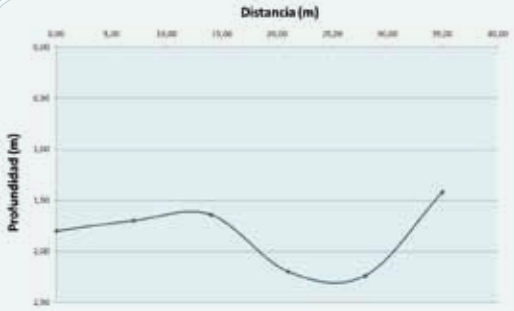


Figura 4-27 Sección de aforo caño Ucrania a la salida de la Ciénaga Colombia

Q prom anual (m^3/s)	Q. min (m3/s) - Técnicas de regionalización						
	TR: 2 años	TR: 2,33 años	TR: 5 años	TR: 10 años	TR: 25 años	TR: 50 años	TR: 100 años
2,68	0,85	0,84	0,79	0,74	0,68	0,64	0,61

Tabla 4-20 Estimación de los caudales promedio y mínimo para diferentes periodos de retorno en la zona de captura de Ciénaga Colombia – Modelo DUBERDICUS (2006)

De acuerdo con los resultados obtenidos, el caudal promedio anual calculado a partir del ejercicio de balance a escala mensual (4,1 m^3/s) es muy similar al valor encontrado mediante el ejercicio de aforo en caño Ucrania, 4,4 m^3/s. La comparación de estos resultados, con el modelo DUBERDICUS, difiere en magnitud, registrando un valor promedio anual multianual de 2,68 m^3/s. Sin embargo, esto era de esperarse teniendo en cuenta que las estimaciones realizadas con este modelo tienen en cuenta las variaciones multianuales de las variables hidrometeorológicas en la zona y no es representativo de las condiciones registradas en el periodo de monitoreo, que correspondió a un periodo especialmente húmedo.

4.3. Modelo de interacción agua subterránea - agua superficial

4.3.1. Superficies freáticas -flujo subterráneo-

Como un resultado obtenido en las primeras etapas de esta investigación, y como punto de partida para lograr una mejor caracterización de la calidad de la información que se estaba procesando y definir requerimientos de nuevos datos (ajuste de la red de monitoreo); se modelaron las superficies piezométricas promedio para dos escenarios hidrológicos (Invierno y verano) combinando información disponible de estudios regionales y los primeros datos de nivelación colectados en el año 2007 (Figura 4-28). Desde aquí, fue posible formular la hipótesis de investigación que asumía que el humedal Ciénaga Colombia es un humedal que depende de las aguas subterráneas de acuerdo con la definición de Custodio (2001). Igualmente, se precisó la necesidad de obtener un Modelo Digital de Elevación, MDE, con resolución de celda de 10 metros, como elemento indispensable para poder modelar adecuadamente la variabilidad de la superficie freática y el flujo subterráneo. Este fue construido mediante el esquema metodológico documentado en el aparte 3.2.1 del capítulo 3.

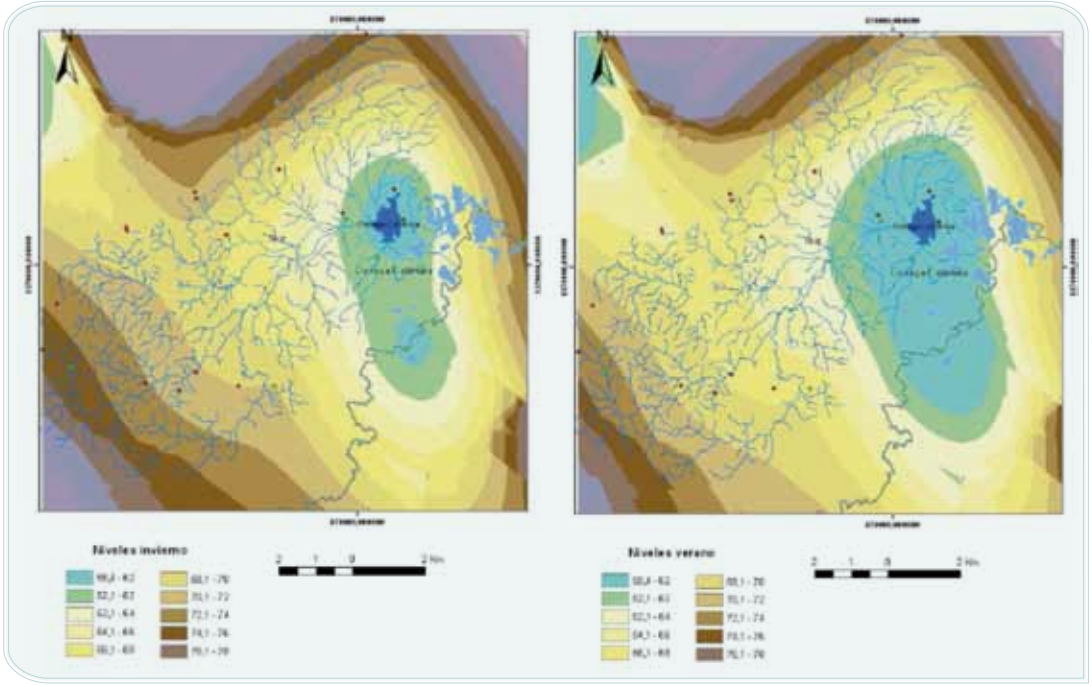


Figura 4-28 Superficies piezométricas promedio de invierno (izq.) y verano (der.)
Zona de captura de Ciénaga Colombia

En la tabla 4-21, se sintetiza un balance estadístico respecto al número de datos de profundidad piezométrica recopilados entre agosto de 2007 y noviembre de 2009. Dado que la red se ha mantenido en el tiempo y sigue operando gracias a la colaboración de la comunidad de la zona de estudio, se considera que la información obtenida a partir de noviembre de 2008 hasta noviembre de 2009, corresponde a información para los procesos de calibración y validación del modelo numérico de interacción.

Código	Nombre	Número de datos	Profundidad media	Profundidad máxima	Profundidad mínima	Desvest	Rango
GWD-01	Hda. La Tinaja	38	0,51	1,07	0,24	0,24	0,83
GWD-02	Costa rica	98	0,49	0,73	0,22	0,13	0,51
GWD-04	La Candelaria	23	2,27	7,65	0,4	2,8	7,25
GWD-05	Dinastía	63	2,61	4,84	1,22	0,78	3,63
GWD-06	El Porvenir-1	50	1,55	2,19	0,49	0,3	1,7
GWD-07	El Porvenir-2	46	1,1	2,7	0,2	0,49	2,5
GWD-08	La Siberia	41	4,03	4,63	2,51	0,41	2,12
GWD-09	Rancho Tijuana	6	1,01	2,12	0,64	0,6	1,48
GWD-10	El Descarralado	4	6,11	6,8	5,35	0,59	1,45
GWD-11	Rancho Alegre-La Fortaleza	101	0,66	1,89	0	0,35	1,89
GWD-12	El Mirador Las Brisas	224	1,07	1,7	0,5	0,27	1,2
GWD-14	Charrascal	120	2,2	6,85	1,15	0,9	5,7
GWD-15	Jesusalen	82	1,39	5,26	0,36	0,68	4,9
GWD-16	El Topacio	96	3,57	9,19	1,39	1,84	7,8
GWD-17	Hoyo Hondo-Jaicana	7	0,66	1	0,11	0,42	0,89
GWD-18	Hda. El Rancho	44	1,55	2,61	1,06	0,27	1,55
GWD-19	El Barro	51	8,28	9,55	7,43	0,44	2,12
GWD-20	Por si Acaso	4	13,85	14,51	13,46	0,49	1,05
GWD-21	Hda Buenos Aires	87	1,05	3,29	0	0,97	3,29
GWD-22	La Coquera	86	0,68	1,71	0	0,45	1,71
GWD-23	Acapulco	53	19,04	21,42	18,49	0,81	2,93
GWD-24	Diana María	11	3,5	6,29	1,79	1,48	4,51
GWD-25	El Paraíso	108	1,11	2,46	0,08	0,22	2,38
GWD-26	La Bonita	79	0,07	0,68	0	0,16	0,68
GWD-27	Guarumal	88	2,33	3,75	0	0,83	3,75
GWD-34	La Siberia	41	4,03	4,63	2,51	0,41	2,12
GWP-01	Piez. Candelaria	118	6,03	6,8	3,8	0,3	3
GWP-02	P. Norte ciénaga	20	3,06	5,5	0	1,82	5,5
GWP-03	P. Aduana-12m	20	6,21	11,5	3	2,27	8,5
GWP-04	P. Aduana-6m	20	4,91	6	1	1,53	5
GWP-05	Piez. Santa Clara	16	7,18	8,47	5,54	0,95	2,93
GWP-06	Piez. Jalisco	118	3,88	4,78	2,8	0,46	1,98

Tabla 4-21 Balance estadístico del funcionamiento de la red de monitoreo piezométrica

La información recopilada (Figura 4-29), fue sometida a un riguroso análisis estadístico para evaluar su calidad e interpretar el comportamiento oscilatorio de los niveles piezométricos en el periodo de observación. No obstante, con el objetivo de visualizar mejor el comportamiento piezométrico en la zona de captura del humedal

Ciénaga Colombia, se presenta en la figura 4-30, las variaciones temporales del comportamiento del nivel freático en las estaciones: Charrascal, Piezómetro Jalisco y La Candelaria.

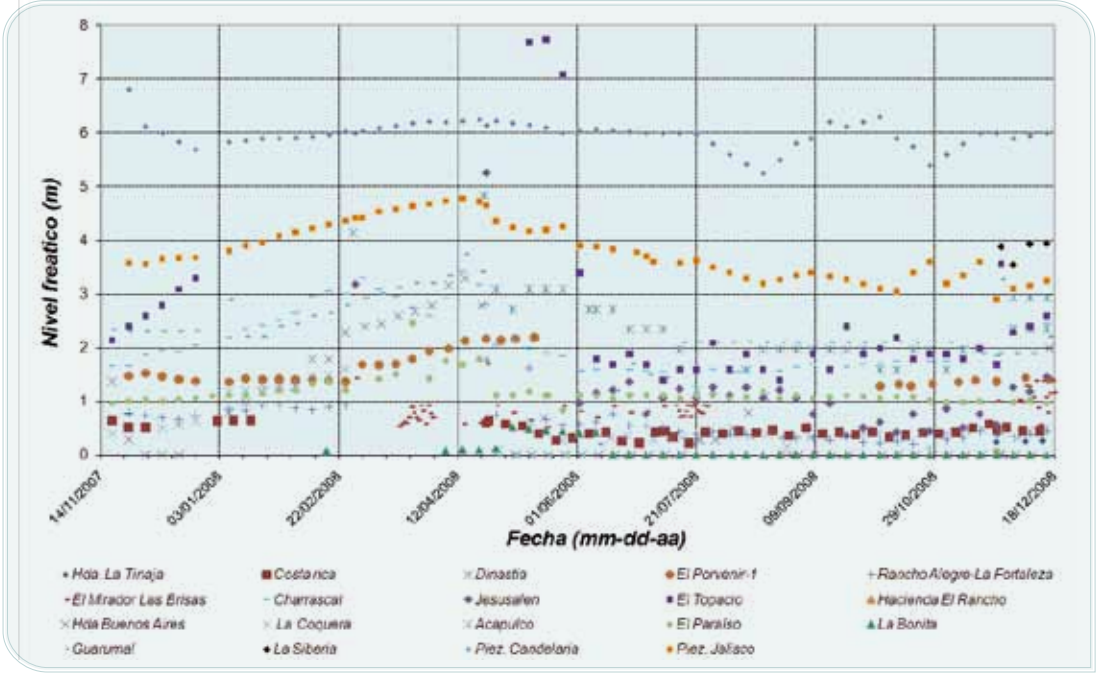


Figura 4-29 Variación del nivel freático registrado durante el periodo de monitoreo agosto 2007 – noviembre 2008

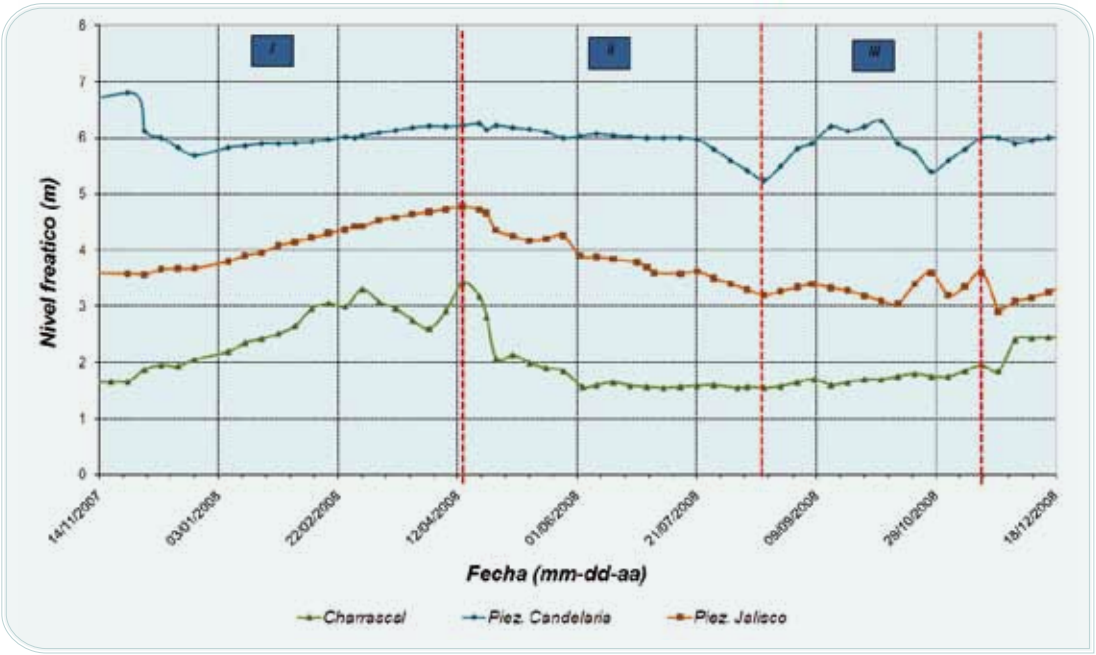


Figura 4-30 Variación del nivel freático promedio mensual en tres estaciones representativas

Con este análisis, soportado en la revisión de cada una las superficies piezométricas mensuales (Figura 4-31), fue posible identificar tres periodos durante los cuales la posición de la superficie freática del acuífero libre registra claras variaciones: i) Periodo entre diciembre 2007 y abril 2008, en el cual se observa un descenso continuo en los niveles freáticos (mayores profundidades); ii) Periodo entre mayo y agosto de 2008, donde se presenta una recuperación de la napa de agua, alcanzando sus más altos niveles (más bajas profundidades); y iii) Un último periodo entre septiembre y noviembre de del 2008, donde se registran condiciones aproximadamente estables con tendencia al ascenso.

Con el fin de representar el modelo de interacción entre las aguas subterráneas y el humedal Ciénaga Colombia se conjugan en una misma figura la posición de la superficie freática, las principales corrientes superficiales de la cuenca y el humedal Ciénaga Colombia, para cada uno de los tres periodos definidos como representativos de la variabilidad del sistema.

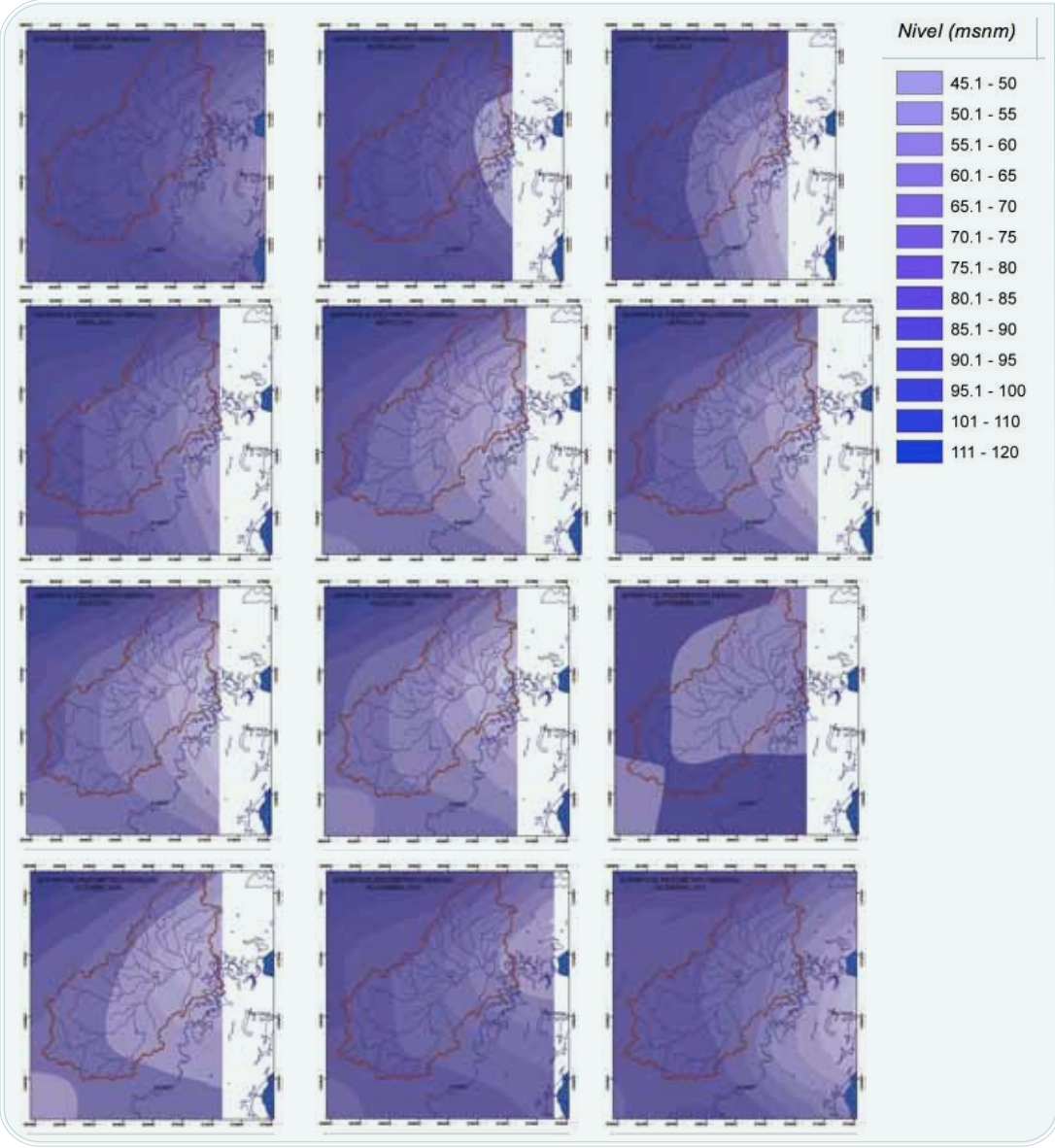
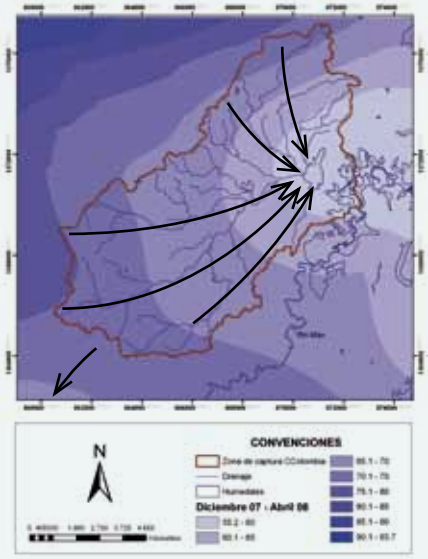
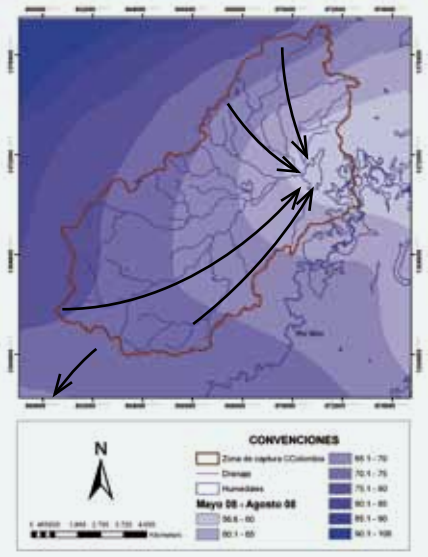


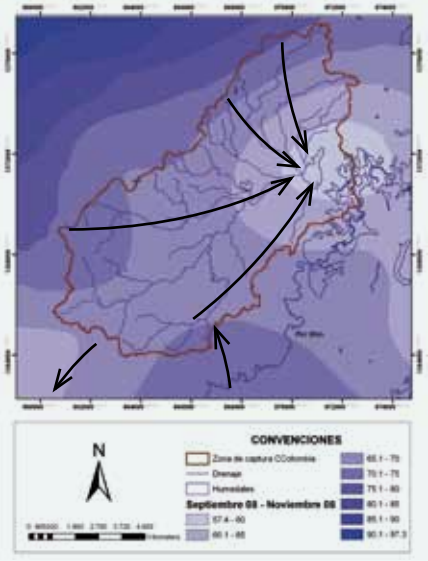
Figura 4-31 Superficies piezométricas mensuales en la zona de captura de Ciénaga Colombia



a) Diciembre 2007 – Abril 2008



b) Mayo– Agosto 2008



c) Septiembre – Noviembre 2008

En la figura 4-32a, se presenta el escenario noviembre-abril, los niveles alcanzan su mayor profundidad y se observa un patrón de flujo desde la divisoria superficial en dirección a la ciénaga en los límites NW y W de la zona de captura. En el limites SW los flujos subterráneos en estos meses transcienden la cuenca dirigiéndose hacia la zona de humedales contigua al humedal Ciénaga Colombia.

Para la época mayo-agosto, figura 4-32b, los niveles se recuperan y se observa el mismo patrón de flujo desde los limites NW y W de la cuenca hacia la ciénaga, mientras hacia el suroeste se registra un desplazamiento de divisoria de aguas subterráneas con relación al periodo anterior, evidenciando además la presencia de fronteras hidráulicas correspondientes a la quebrada Ciénaga y sus tributarios quebrada del Medio y quebrada Los Aburridos. Flujos subterráneos desde este punto hacia la Ciénaga Colombia también son identificados. Finalmente el escenario septiembre-octubre, figura 4-32c, se conserva el mismo patrón de flujo anterior, aunque la divisoria al sur es más marcada y parece presentarse un flujo que trasciende desde la divisoria superficial al sur.

En los tres modelos de superficie piezométrica mensual, la interacción del acuífero libre con los cuerpos de agua superficiales es clara, quedando manifiesto el aporte de agua subterránea como flujo base a las corrientes y al humedal.

Para tratar de establecer la respuesta del acuífero a la precipitación se comparan en la figura 4-33 los datos de nivel piezométrico mensual de la estación Piezómetro La Candelaria con la lluvia mensual registrada en la estación Hacienda La Candelaria -sector Santa Rosita- en el periodo diciembre 2007 – Noviembre 2008; donde se aprecia que las variaciones en el nivel piezométrico se dan desfasadas en el tiempo, del orden de un mes, con respecto a la variación de las lluvias locales.

A partir del análisis realizado por Gómez (2010) a 14 estaciones con registros de nivelación piezométrica respecto a la desviación acumulada mensual de la lluvia para el año 2008, se documentan los siguientes comportamientos para las estaciones con influencia en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia (Figura 4-34).

Figura 4-32 Superficies piezométricas para tres periodos característicos

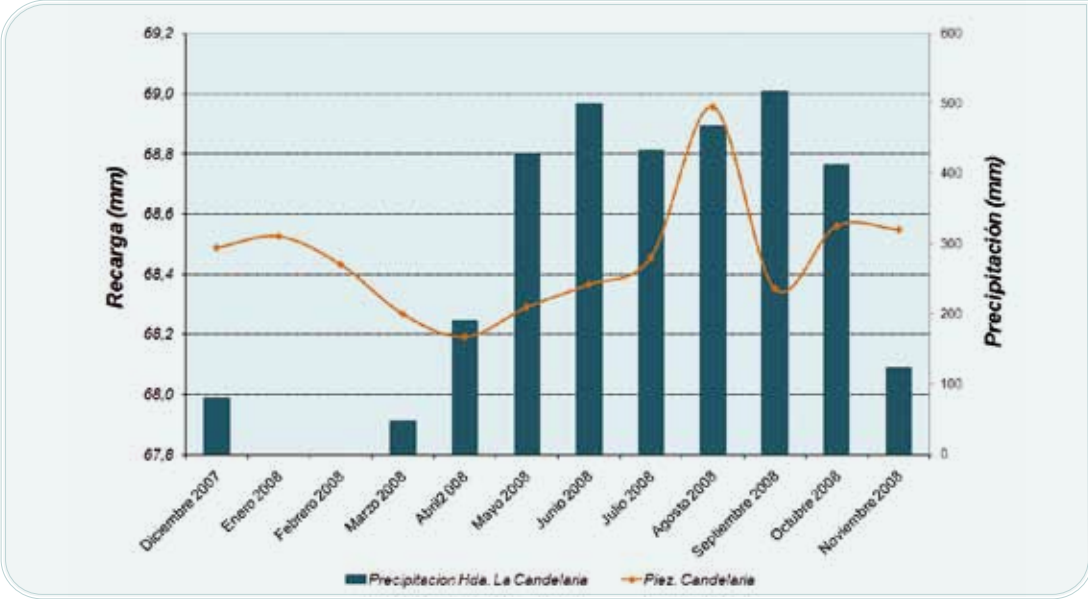
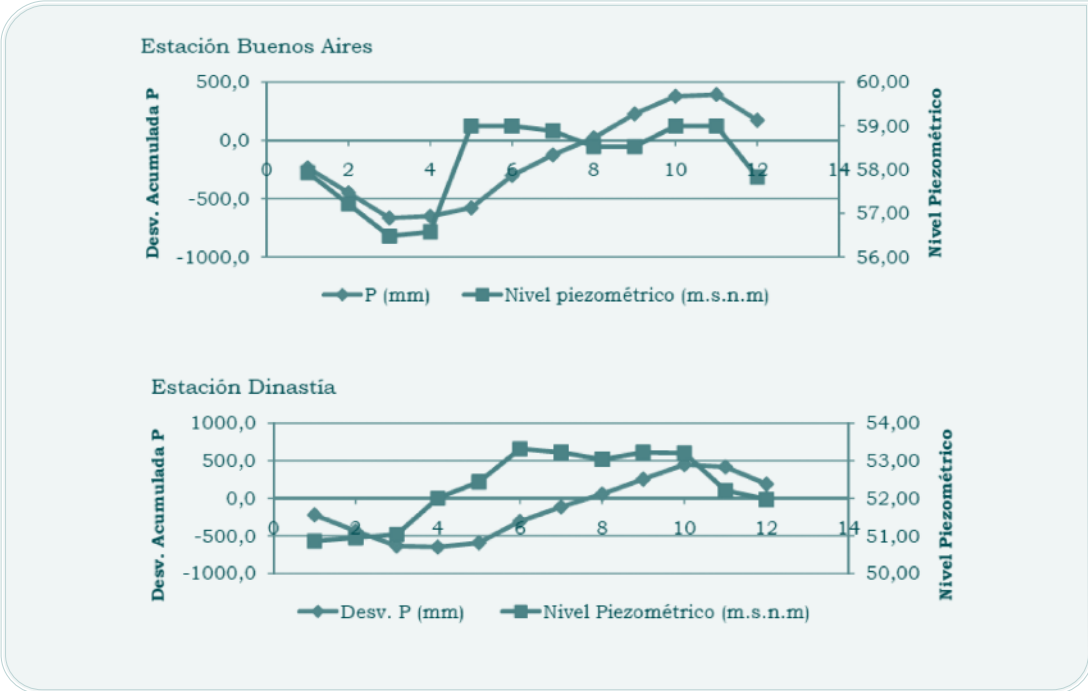


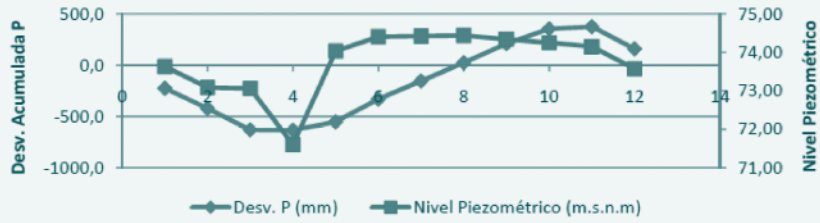
Figura 4-33 Relación de la variación del nivel piezométrico con respecto a la distribución de la precipitación en la zona de captura de Ciénaga Colombia

En la estación Buenos Aires, el ascenso de nivel, se da en el mismo mes en el que inician las lluvias, esto puede explicarse debido a la cercanía de esta estación al río Man. En la estación Dinastía, se produce un ascenso del nivel antes de que inicien las lluvias. En las estaciones restantes (Rancho Alegre – La Fortaleza, Charrascal, Jesusalen, Piezómetro La Candelaria y Piezómetro Jalisco) el nivel piezométrico comienza su ascenso un mes después de iniciadas las lluvias. Excepto en las estaciones Costa Rica y Guarumal, donde el nivel continúa ascendiendo durante los meses de lluvia. Respecto al descenso de nivel, este se produce a partir del mes de noviembre cuando las lluvias cesan (Figura 4-33).

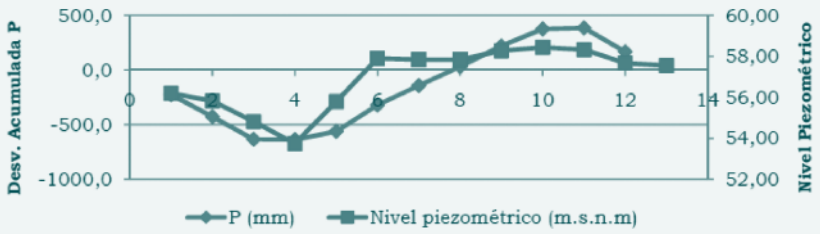


Estación Rancho Alegre – La Fortaleza

Estación Charrascal

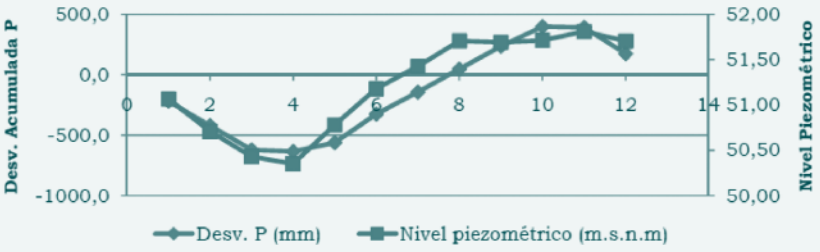


Estación Jesusalén



Piezómetro La Candelaria

Piezómetro Jalisco



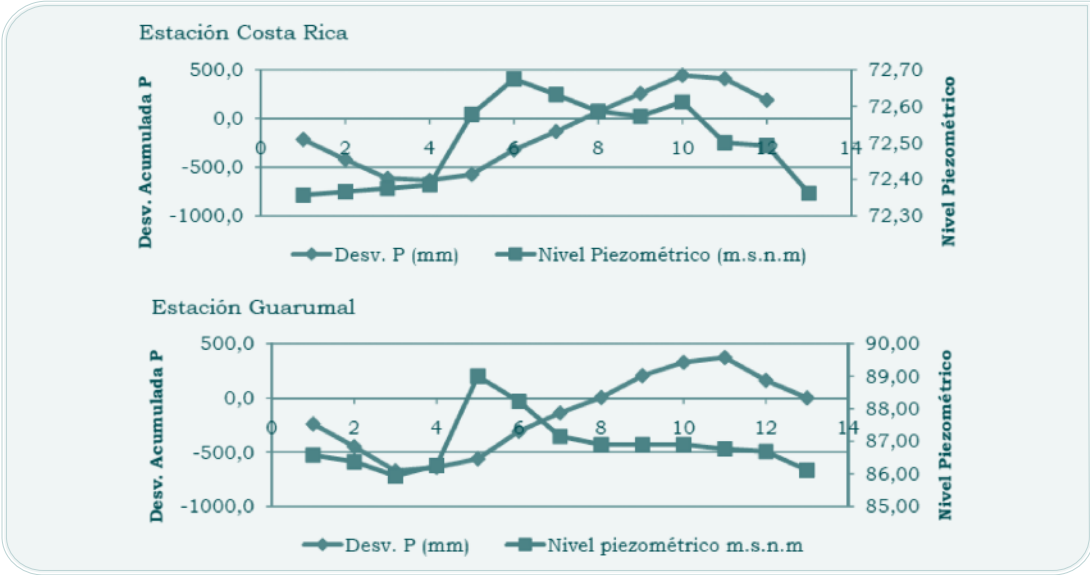


Figura 4-34 Variación de nivel piezométrico y desviación acumulada de la precipitación para el periodo 2008

4.3.2. Modelo esquemático de interacción

En la figura 4-35 se sintetiza en un diagrama de bloques el modelo hidrológico conceptual de interacción para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, en el cual se muestra en correspondencia con las observaciones y mediciones en campo la interconexión entre las aguas subterráneas del acuífero libre con las corrientes superficiales y principalmente con el humedal Ciénaga Colombia. Igualmente, se aprecia la influencia de este sistema en todo el complejo de humedales asociados a la cuenca baja del río Man.

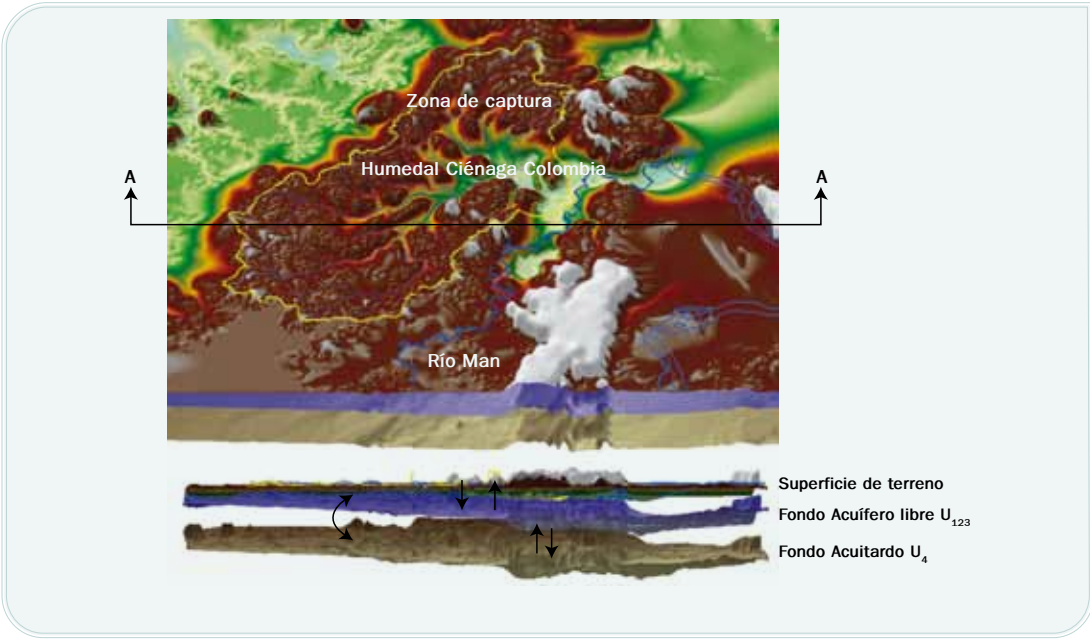
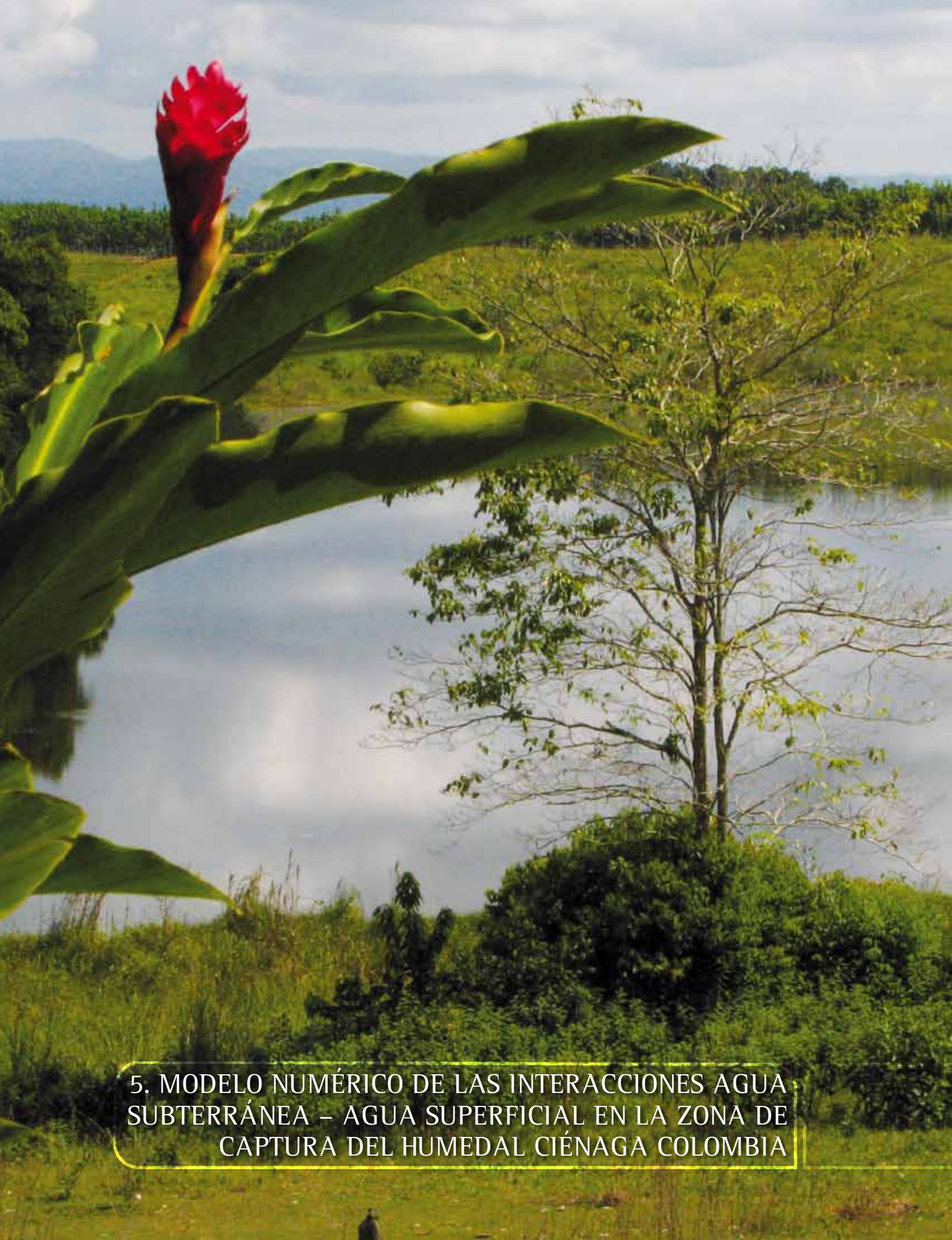


Figura 4-35 Modelo hidrológico conceptual del sistema hidrológico Ciénaga Colombia. Planta (Arriba) y Corte A-A (Abajo)



5. MODELO NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES AGUA SUBTERRÁNEA – AGUA SUPERFICIAL EN LA ZONA DE CAPTURA DEL HUMEDAL CIÉNAGA COLOMBIA

Agua

Hay países que yo recuerdo
como recuerdo mis infancias.
Son países de mar o río,
de pastales, de vegas y aguas.
Aldea mía sobre el Ródano,
rendida en río y en cigarras;
Antilla en palmas verdi-negras
que a medio mar está y me llama;
¡roca lígure de Portofino,
mar italiana, mar italiana!

Me han traído a país sin río,
tierras-Agar, tierras sin agua;
Saras blancas y Saras rojas,
donde pecaron otras razas,
de pecado rojo de atridas
que cuentan gredas tajeadas;
que no nacieron como un niño
con unas carnazones grasas,
cuando las oigo, sin un silbo,
cuando las cruzo, sin mirada.

Quiero volver a tierras niñas;
llévenme a un blando país de aguas.
En grandes pastos envejezca
y haga al río fábula y fábula.
Tenga una fuente por mi madre
y en la siesta salga a buscarla,
y en jarras baje de una peña
un agua dulce, aguda y áspera.

Me venza y pare los alientos
el agua acérrima y helada.
¡Rompa mi vaso y al beberla
me vuelva niñas las entrañas!

Gabriela Mistral

5. MODELO NUMÉRICO DE LAS INTERACCIONES AGUA SUBTERRÁNEA – AGUA SUPERFICIAL EN LA ZONA DE CAPTURA DEL HUMEDAL CIÉNAGA COLOMBIA

Este capítulo presenta los resultados del modelo numérico de flujo y transporte en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia construido a partir de la integración del modelo hidrológico conceptual descrito en el Capitulo 4 y la adaptación del modelo matemático con solución en diferencias finitas usando el software MODFLOW – Groundwater Vistas – GV – V.4.25 (Rumbaugh y Rumbaugh 2004), suministrado por ESI. Inc para este proyecto.

El proceso de modelación (desde el aparte 5.1 hasta 5.9) sigue las etapas documentadas en el esquema metodológico de la figura 3.4. En el numeral 5.10, se presenta cuatro escenarios de simulación que indican la respuesta del sistema ante la afectación por condiciones naturales o antrópicas. Por último en el 5.11 se aborda la modelación de transporte de solutos.

5.1. Diseño del modelo

El diseño del modelo numérico de flujo para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia tiene como base el modelo hidrológico conceptual a partir del cual se definió el área de modelación, el tamaño de la malla numérica (el número de filas y columnas), el número de capas, las propiedades hidráulicas, las condiciones iníciales y de frontera para los estados permanente y transitorio.

5.1.1. Discretización de la malla

De acuerdo con la extensión del área a modelar, 84 Km^2, se definió inicialmente una malla de 180 filas y 170 columnas con celdas cuadradas de 100 metros y con origen de coordenadas en el punto 859.320 m de longitud y 1.360.990 m de latitud (Figura 5-1). La malla definitiva consta de 720 filas y 680 columnas conformando una red de 489.600 celdas de 25 metros.

Para la discretización vertical del modelo, se consideró que las unidades hidrogeológicas de interés para el sistema lo constituyen el acuífero libre U_{123} y el acuitardo o capa confinante, U_4 (Base del modelo). Los espesores de cada capa corresponden

al espesor medio de las unidades hidrogeológicas (Mejía et al., 2007), con referencia al MDE (Quintero et al., 2009), en las coordenadas asignadas al nodo central de cada celda (Figura 5-2).

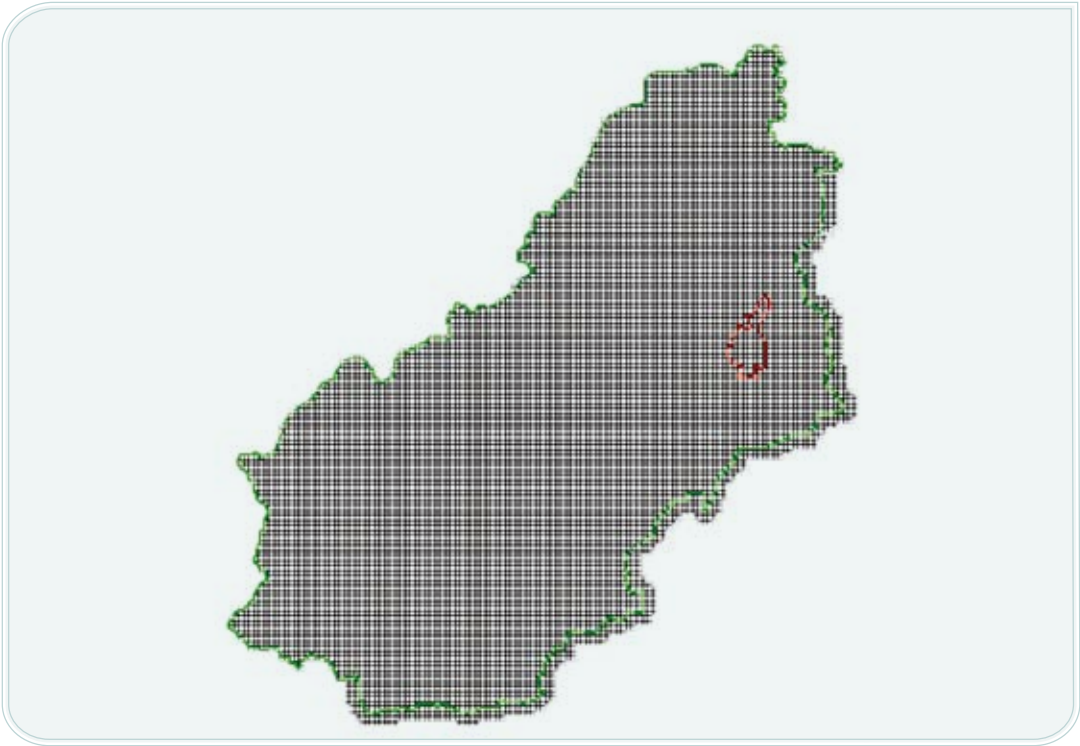


Figura 5-1 Discretización de la malla para el zona de captura de Ciénaga Colombia

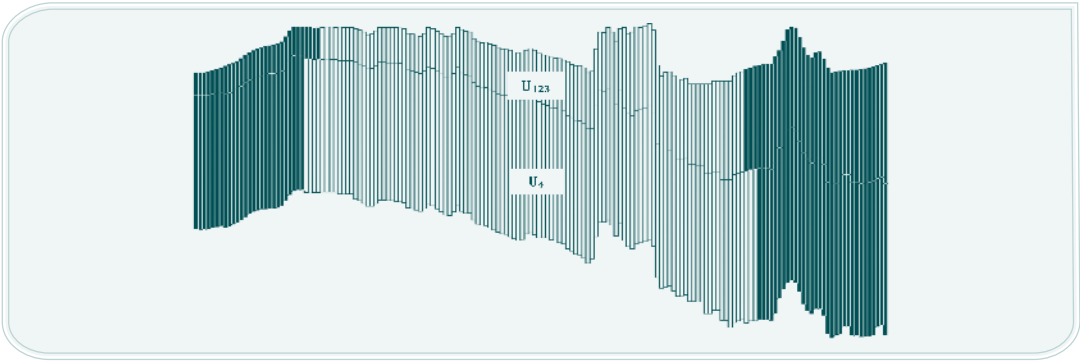


Figura 5-2 Espesor de las celdas para la modelación numérica, Sección Oeste – Este a través de la fila 81 entre las columnas 46 y 134

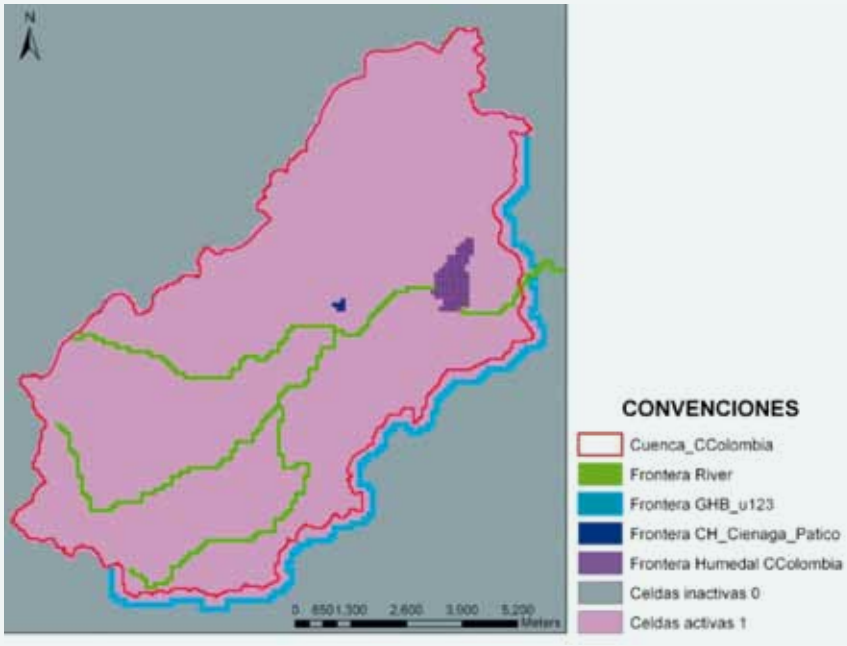
5.1.2. Definición de condiciones iníciales, de frontera y parámetros semilla del modelo.

Para la simulación en estado permanente se tomó como condición inicial la superficie topográfica del Modelo Digital de Terreno con resolución de 10m. Las condiciones de frontera comprenden barreras impermeables –No flow–, de cabeza constante –Constant Head–, Ríos –River–, flujos dependientes de la cabeza (flujo distante) –General Head Boundary– y fronteras tipo Lake para representar el sistema léntico (Tabla 5-1 y Figura 5-3). Su ingreso al modelo se realizó mediante la implementación de una interface tipo Linked en la que el Sistema de Información Geográfica –SIG– y modelo son básicamente autónomos, con el fin de preparar los archivos de entrada y editar las salidas con el GV.

Capa / Unidad Hidrogeológica	Condición de Frontera				
	No Flow	River	GHB	CH	Lake
Acuífero Libre U_{123}	Corresponde a la divisoria subterránea que permanece constante tanto en época de invierno y verano, aproximándose a la divisoria superficial de la cuenca del río San Jorge en la dirección NW –W-SW de la zona de captura, en límites con el departamento de Córdoba. En el límite E-SE-S la divisoria oscila entrando o saliendo de la zona de captura.	Q. Ciénaga con sus afluentes: Q. Los aburridos y Q. del Medio	Frontera distante a 200 m de la cuenca abarcando el limite E - SE - S.	Ciénaga Patico	Humedal Ciénaga Colombia
Acuitardo U_4		*NA	Frontera distante a 300 m de la cuenca alrededor de toda la zona de captura	*NA	*NA

*NA: No aplica.

Tabla 5-1 Condiciones de frontera para la zona de captura de Ciénaga Colombia



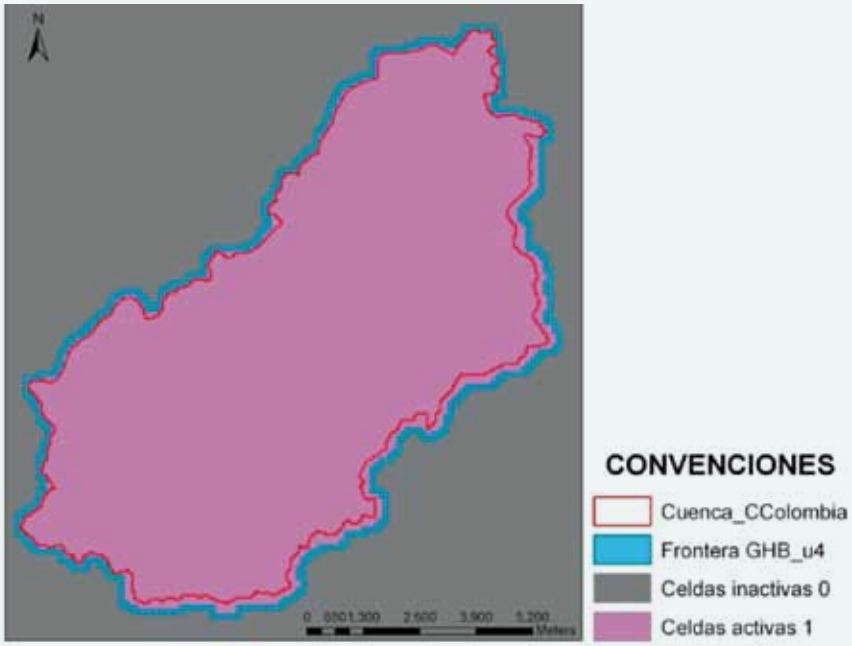


Figura 5-3 Definición de las condiciones de frontera en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Unidad U_{123} (arriba) y Unidad U_4 (abajo)

El modelo cuenta con un total de 979.200 celdas distribuidas en dos capas, de las cuales 588.242 son celdas activas que corresponden a la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

Inicialmente, las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas (Tabla 5-2 y Figura 5-4), fueron tomadas del modelo regional del Bajo Cauca antioqueño (Betancur, 2008), en virtud de que no fue posible la realización de pruebas de bombeo especificas para la zona de estudio.

Capa / Unidad Hidrogeológica	Conductividad Horizontal Kxx=Kyy) m/día	Conductividad vertical (Kxx=Kyy) m/día	Coeficiente de almacenamiento S
Acuífero Libre – U_{123}	2	0,02	0,05 – 0,3
LAYCON =1			
Acuitardo – U_4	1	0,012	10^{-3} – 10^{-5}
LAYCON = 3			

Tabla 5-2 Propiedades hidráulicas promedio de las unidades hidrogeológicas en la zona de captura de Ciénaga Colombia

El valor de recarga inicial para el modelo durante la fase exploratoria (0,0007 m/d) se consideró como el 10% de la precipitación promedio anual multianual, aplicados como recarga directa sobre toda el área de estudio. Los valores de recarga y la conductividad hidráulica fueron documentados en el modelo conceptual y constituyen parámetros para la calibración del modelo numérico.

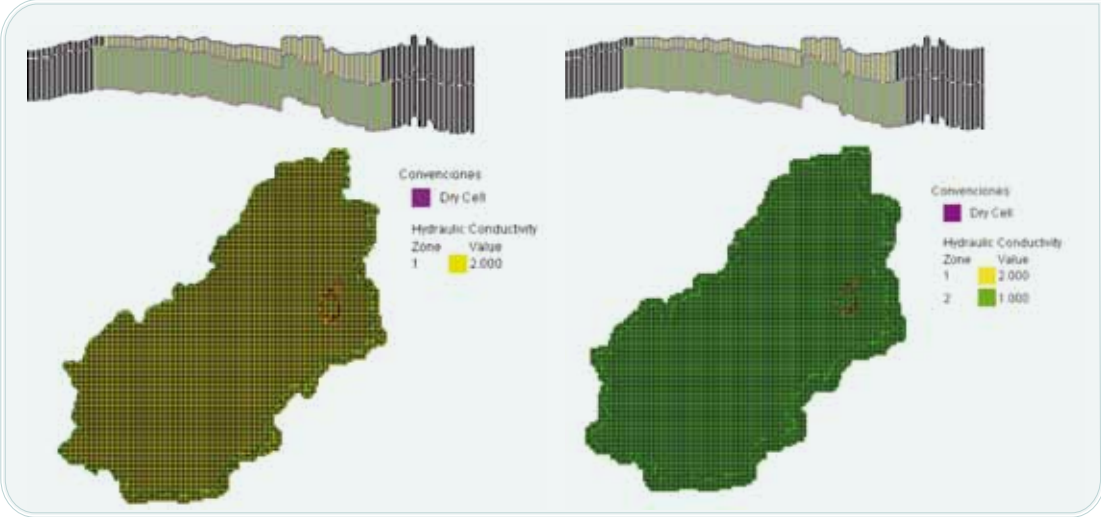
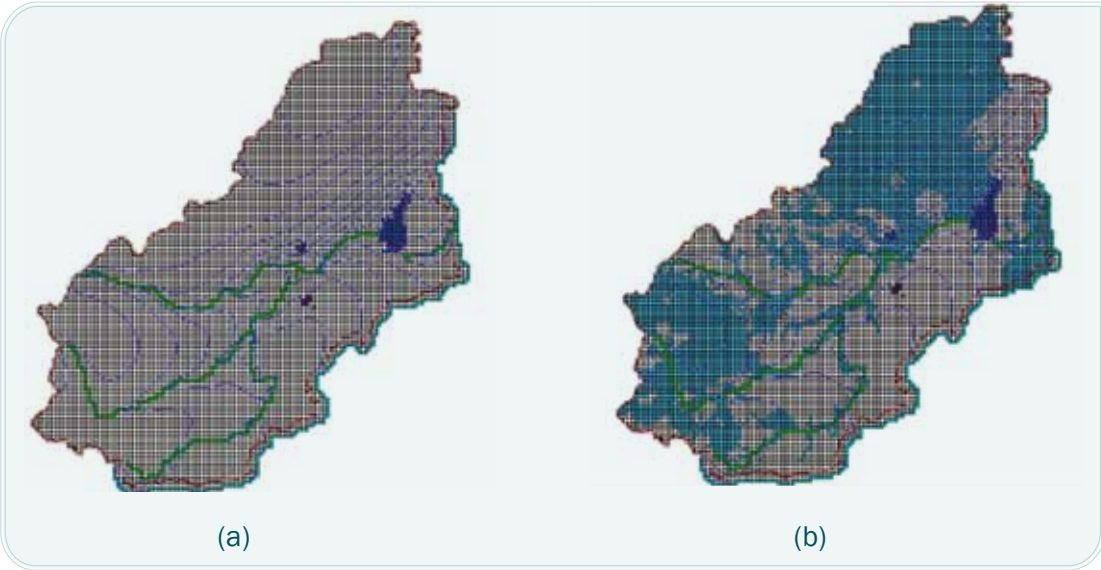


Figura 5-4 Distribución de la conductividad horizontal en las unidades hidrogeológicas U_{123} (izq) y Unidad U_4 (der)

5.2. Implementación y ejecución del modelo numérico de flujo.

La modelación tipo exploratoria busca con las primeras corridas y análisis de sensibilidad global de los resultados, detectar la necesidad de refinar la discretización de la malla propuesta inicialmente, así como validar, ajustar o redefinir las condiciones iniciales y de frontera, los parámetros semilla del modelo, o incluso el modelo hidrológico conceptual propuesto.

Todos los resultados de este proceso fueron consignados en un diario de modelación, con el objetivo de ir controlando y superando gradualmente en cada una de las corridas, los posibles errores o "warnings" en la fase de alimentación del modelo, así como la presencia de celdas secas en zonas inundables, lentes (celdas húmedas) en zonas secas y no convergencias en la etapa de ejecución (Figura 5-5).



(a) (b)

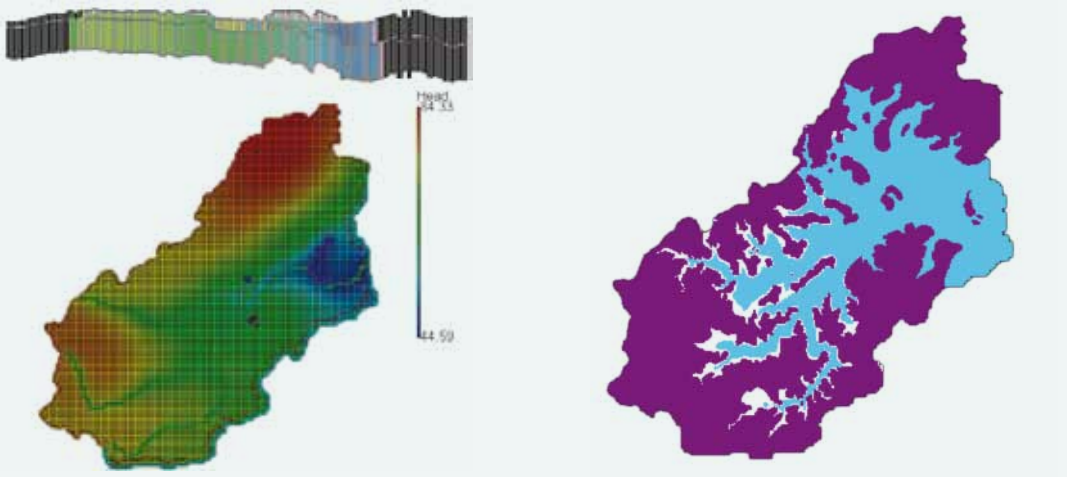


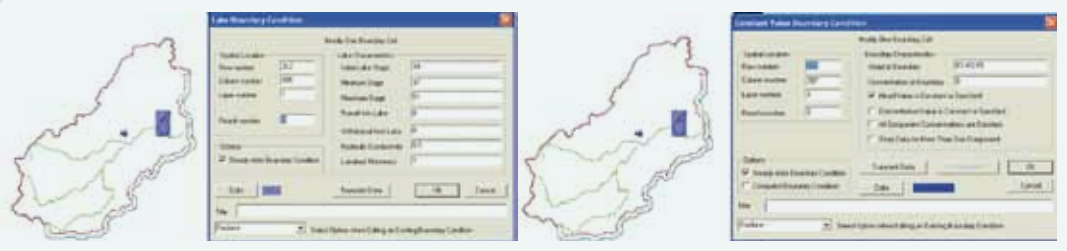
Figura 5-5 Resultados preliminares del modelo numérico exploratorio en la zona de captura de Ciénaga Colombia (a. Contornos piezométricos promedio, b. Zonas de inundación, c. superficie piezométrica promedio y d. zona con celdas secas)

En la fase de alimentación se definieron los parámetros de entrada para cada una de las condiciones de frontera, que corresponden inicialmente a los valores de conductancia calibrados en el modelo regional del Bajo Cauca antioqueño (Betancur, 2008) (Tabla 5-3 y Figura 5-6).

Frontera	Reach	Conductancia	Head
River	1	10000	MDE (Topo)+ 0,5 m
Constant Head	1	NA	Corresponde al valor promedio de la superficie topográfica (63,45m)
Lake	1	312,5	Initial lake stage: 49 m
			Maximum Stage: 51 m
			Mínimum Stage: 47 m
GHB U_{123}	1	20000	Superficie piezométrica monitoreo periodo Febrero 2008 - 2009
GHB U_4	1	4000	Superficie piezométrica monitoreo periodo Febrero 2008 - 2009

* NA: No aplica

Tabla 5-3 Parámetros de entrada para las condiciones de frontera en el humedal Ciénaga Colombia –modelo exploratorio–



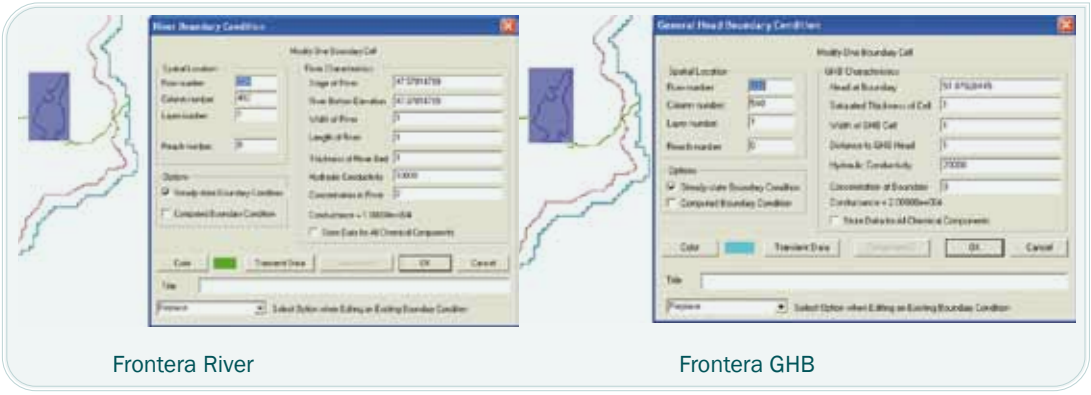


Figura 5-6 Parámetros de entrada del GV para las condiciones de frontera de la zona de captura de Ciénaga Colombia

5.2.1. Resultados preliminares y análisis de sensibilidad global.

Los resultados preliminares evidenciaron que para la condición anual se conservan las tendencias del patrón de flujo de agua subterránea identificado en la superficie piezométrica promedio del periodo de monitoreo comprendido entre febrero 2008 y febrero de 2009 (Figura 5-7). Se observan amplias zonas de inundación en los límites noroeste y suroeste de la zona de captura, que no corresponden en toda su extensión con la dinámica hídrica de la cuenca; aunque se tiene evidencia de la presencia de pequeños humedales y zonas de afloramiento en la parte alta; su extensión y distribución sugirió realizar algunos ajustes a los parámetros hidráulicos y a las condiciones de frontera.

La ocurrencia de 145 celdas secas en la parte central de la cuenca (0,02% del total de celdas activas), están asociadas a la presencia de un alto topográfico de 70 m.s.n.m característico de la zona de captura.

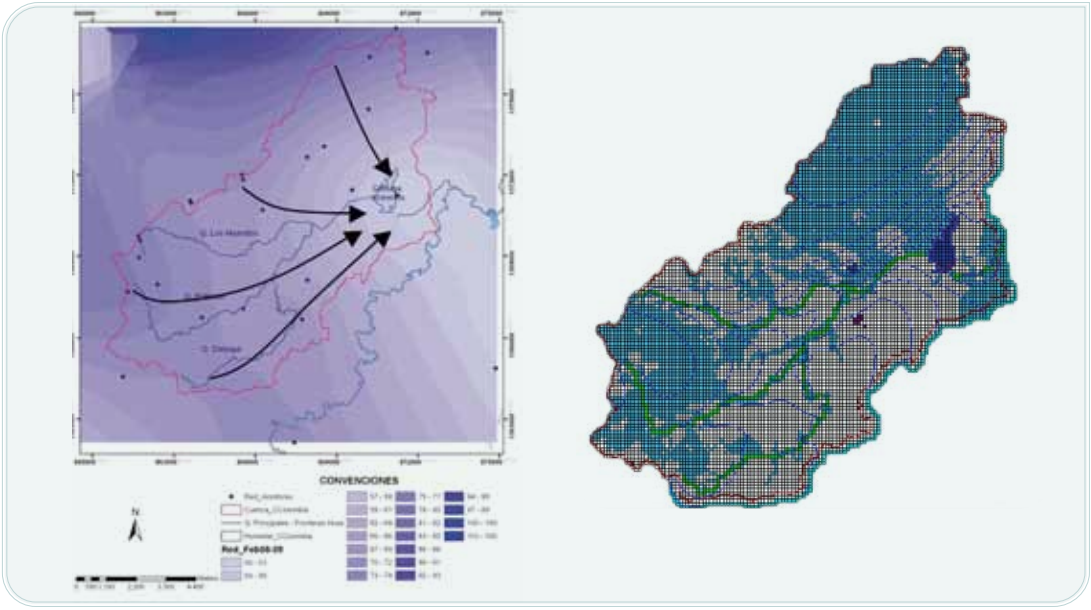


Figura 5-7 Superficie freática anual para la zona de captura de Ciénaga Colombia vs. resultados preliminares modelación numérica exploratoria

Los ejercicios de análisis de sensibilidad global al modelo en la fase exploratoria, se realizaron aplicando factores multiplicadores de 0,5; 0,7; 1,5; 2,0 y 2,5 a los valores de conductancia de las fronteras, a la recarga y a la conductividad horizontal y vertical de cada capa (Figura 5-8). Los resultados evidenciaron que el modelo no es sensible a cambios en los valores de conductancia para las fronteras River y GHB en ambas capas, pero lo es, a variaciones de conductividad y a la recarga; como era de esperarse.

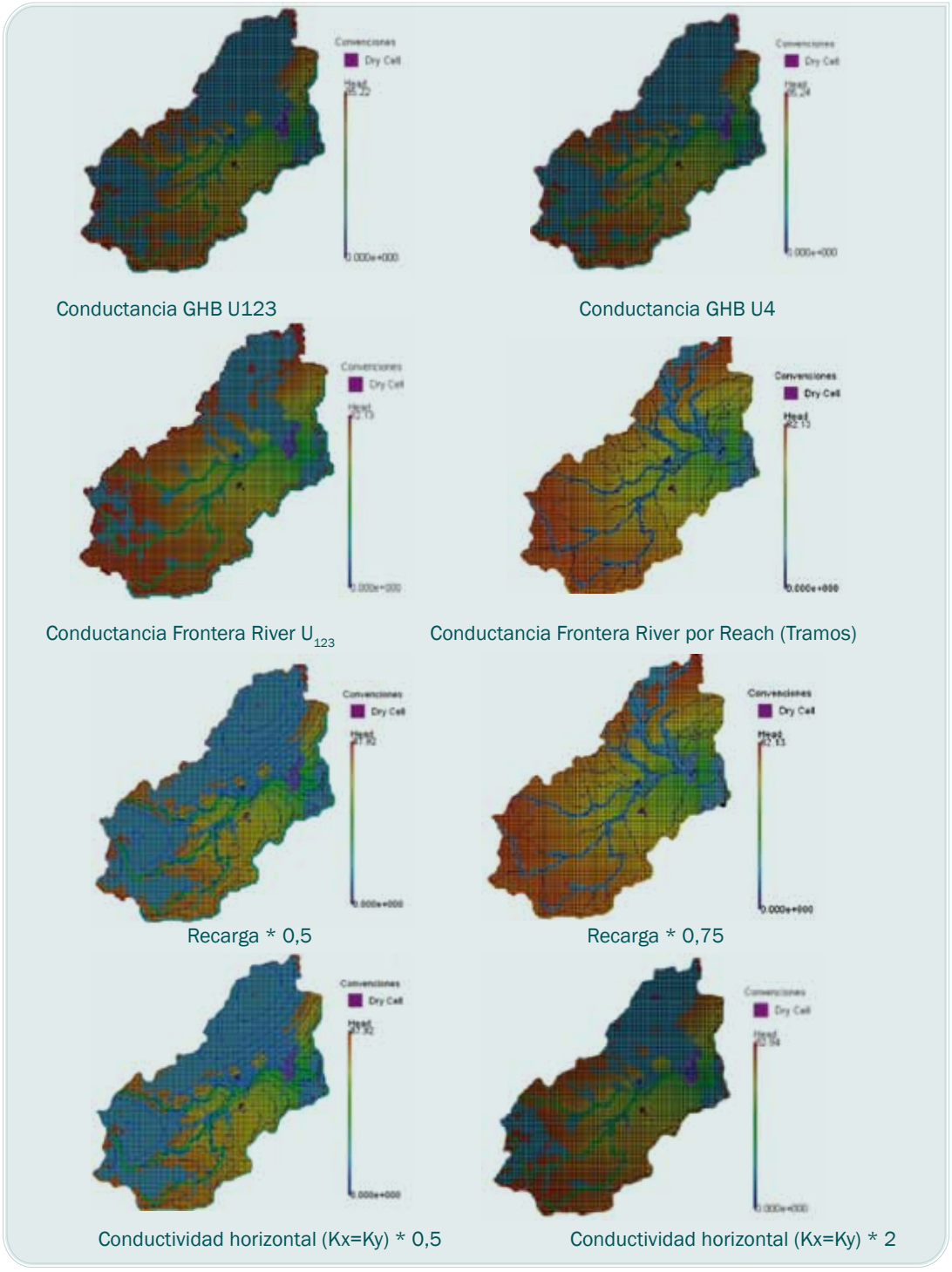


Figura 5-8 Análisis de sensibilidad global al modelo numérico exploratorio

5.3. Ajuste al diseño del modelo numérico

De acuerdo con los resultados obtenidos en la fase exploratoria, se identificó la necesidad de refinar la malla con el objetivo de lograr mayor precisión en la modelación de la dinámica hídrica de flujo entre los compartimentos superficial y subterráneo. Para la zona de captura de la Ciénaga Colombia, se cuenta con un modelo digital de terreno con resolución de celda de 10 m.

El refinamiento del modelo de malla consistió en pasar de un modelo de 100 m con un tamaño total de 30.600 celdas a uno de 489.600 celdas, representadas en 720 filas y 680 columnas con el mismo origen de coordenadas del modelo inicial (Figura 5-9) para cada una de las capas.

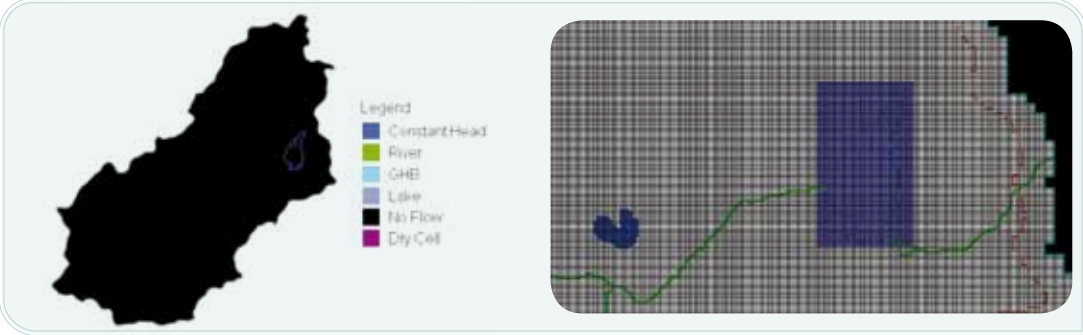


Figura 5-9 Modelo numérico con tamaño de celda de 25 m en GV

Pasar de un modelo tipo exploratorio a uno de simulación hizo necesario, además del refinamiento de la malla, precisar la ocurrencia en superficie (afloramiento) de una pequeña área en la que se manifiesta la unidad U_4; para este sector el modelo numérico se represento con celdas de un espesor mínimo -1m- correspondiente a U_{123} a las que se le asignó valores de conductividad horizontal y vertical -0,01 m/d y 20 m/d respectivamente- que aseguren el transito rápido de agua desde la unidad libre hacia la unidad que la subyace (Figura 5-10).

El proceso de calibración para la recarga y para las condiciones de frontera permitió obtener un modelo con las características descritas en la tabla 5-4.

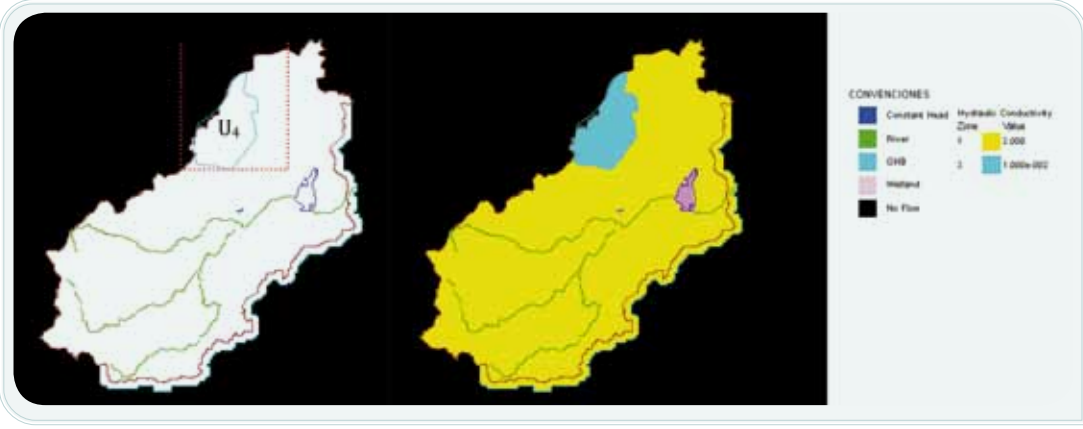


Figura 5-10 Conceptualización del afloramiento de la unidad U_4 en la zona de captura de Ciénaga Colombia

Frontera	Reach	Conductancia	Head
River	1	1.250. Adoptando una conductividad para el lecho de las corrientes de 10 m/d.	MDE (Topo)+ 0,5 m
Constant Head	1	NA	Corresponde al valor promedio de la superficie topográfica (63,45m)
Lake	1	Valor constante 312,5. Considerando una K constante de 0,5 m/d y espesor del lecho según datos de distribución de sedimentos (Figura 4-8)	Initial lake stage: 49 m
			Maximum Stage: 51 m
			Mínimum Stage: 47 m
GHB $U_{123\ y}$ GHB U_4		Variable en función del espesor de la unidad hidrogeológica $C = \frac{K_b * A}{B}$	Superficie piezométrica monitoreo periodo Febrero 2008 – Febrero 2009
		K_b: Conductividad hidráulica del material de la frontera (L/T), correspondiente a las unidades U_{123} y U_4.	
		A: área de la frontera (L^2).	
		B: Espesor o ancho de la frontera (L)	
		Ku_{123}= 2 m/d	
		Ku_4= 1 m/d	
		A= Δx*b	
		B=Δy b = espesor de cada una de las unidades (Mejía et al., 2007)	

Tabla 5-4 Parámetros de entrada para las condiciones de frontera en el humedal Ciénaga Colombia- modelo con tamaño de celda de 25 m

5.4. Calibración del modelo en estado permanente

La calibración en estado permanente permitió reproducir de manera satisfactoria, las cabezas piezométricas medidas para el acuífero libre, así como describir una interacción lógica con el acuitardo, las corrientes superficiales y el humedal.

El proceso de calibración se inició con condiciones de cabeza piezométrica próximas a la superficie del terreno, un criterio de convergencia para cambio máximo de cabeza por celda de 0,01 m y un residual de 1. Estos valores se establecieron a partir de las corridas preliminares, buscando resultados consistentes con la realidad física del sistema.

La calibración de fronteras para las condiciones River, GHB y lake, se logró mediante el ajuste de los valores de conductancia y la inclusión de nuevas fronteras tipo River para las corrientes superficiales de la parte norte y noroccidental de la cuenca, el drenaje que escurre por estas corrientes resolvió las condiciones de celdas inundables que se producían en el modelo exploratorio y en las primeras ejecuciones del modelo refinado (Figura 5-11).

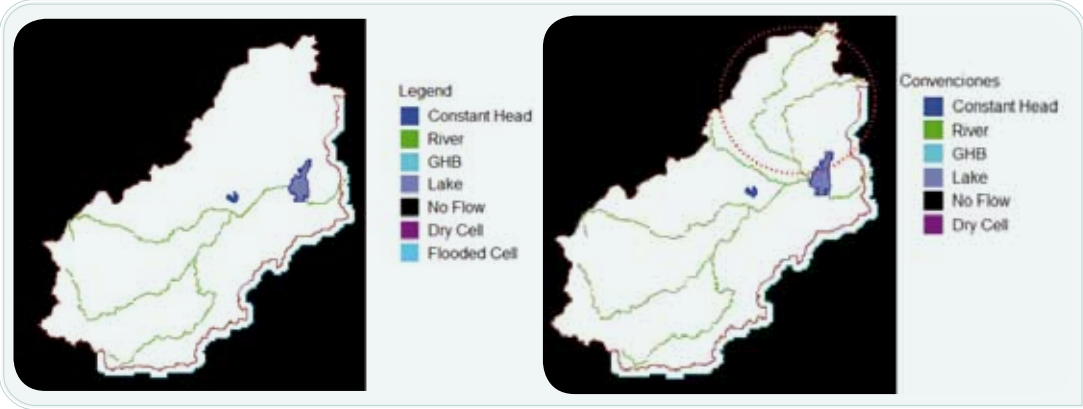


Figura 5-11 Inclusión de nuevas fronteras River en el modelo permanente (Resolución 25m)

Para la recarga se definieron cinco zonas siguiendo el gradiente de la precipitación promedio anual multianual identificado (Figura 5-12).

Los rangos de recarga se ajustan muy bien con respecto a los órdenes de magnitud obtenidos para la zona 2 del modelo regional del Bajo Cauca (Betancur, 2008), los valores promedio son del orden de 0,0002 m/d (Figura 5-13) cerca del 10% de la precipitación promedio anual neta de la zona, tal como se obtuvo en el modelo conceptual.

Empleando el solucionador PCG2[1] (Tabla 5-5), se logró reproducir la superficie piezométrica para la unidad U_{123}

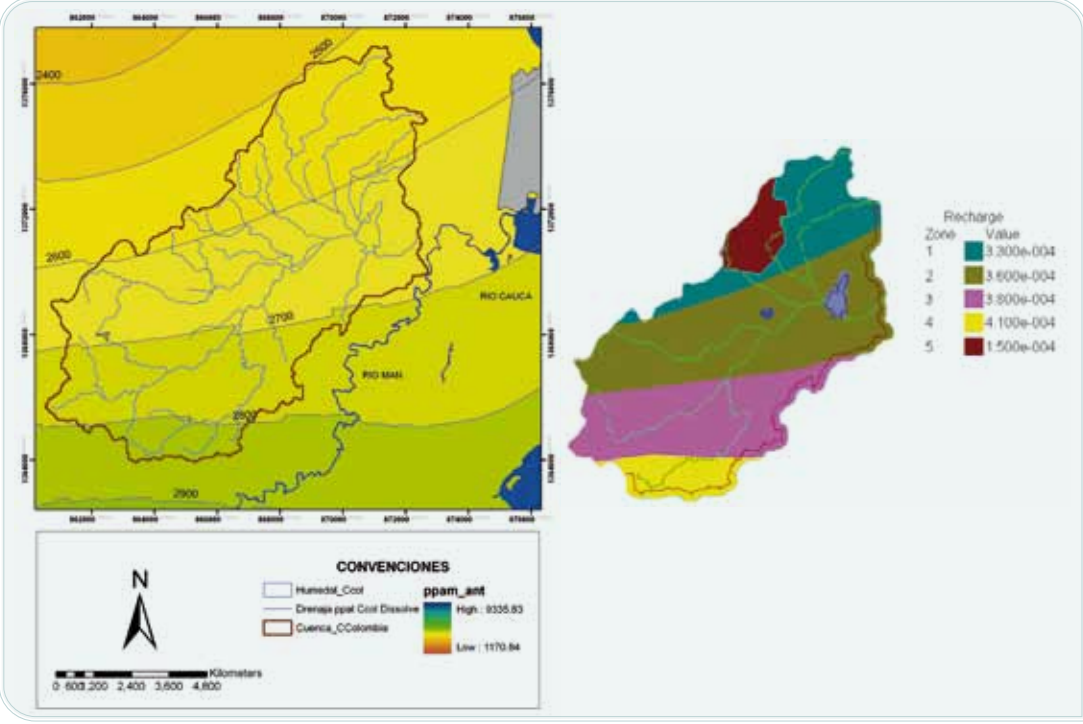


Figura 5-12 Condiciones de calibración de la recarga (m/d) en la zona de captura de Ciénaga Colombia

1 *PCG2: The Preconditioned Conjugate – Gradient Package. Este paquete proporciona medios adicionales para soluciones no lineales en problemas de flujo subterráneo.*

Parámetro	Valor
Solucionador numérico	PCG2
Máximo número de iteraciones externas - OUTER	250
Máximo número de iteraciones internas - INER	100
Criterio de convergencia en el cambio de cabeza	0,01m
Criterio de convergencia en el error residual	0,5 m^3/d
Tipo de solución para los estados del lago – THETA = 1,0	Fully-Implicit
Número máximo de iteración de Newton - NSSITR	50
Criterio de Convergencia para el lago - SSCNCR	0,01m

Tabla 5-5 Parámetros del método numérico en estado permanente

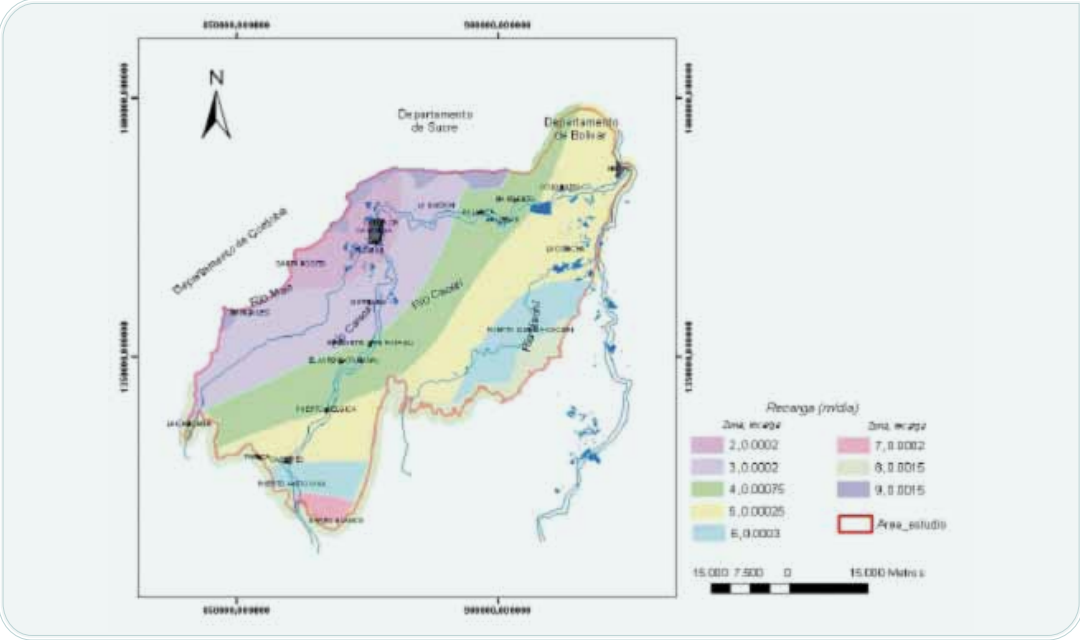


Figura 5-13 Condiciones de calibración para la recarga modelo regional del Bajo Cauca antioqueño (Betancur, 2008)

Cada solucionador tiene un criterio de convergencia que controla cuando la solución del modelo es adecuada. Este modelo evalúa el error en el balance de agua con un criterio de discrepancia inferior al 1%. Sin embargo, esta regla no siempre se cumple; Ahlfeld y Hoque (2008), reportaron un caso donde el modelo presentó un error en el balance de agua del 0,012%, que no fue lo suficientemente apropiado para los propósitos de la modelación. Se realizó un análisis de sensibilidad al criterio de convergencia en el error residual (Tabla 5-6 y Figura 5-14) el cual representa el máximo error de balance de masa por celda. Mientras este error en el balance sea <0,1%, el error residual puede ser de 1, de lo contrario, debe disminuirse por debajo de uno. Se evaluó también el efecto de un cambio en la magnitud de los errores de la calibración por targets en el estado permanente.

Criterio de convergencia en el error residual (m^3/d)	Entradas (m^3/d)	Salidas (m^3/d)	% de error balance	Residual Mean	Residual Stándar Dev.	Absolute Residual Mean
0,1	66936,83	66777,48	0,24	1	3,25	2,91
0,25	67005,11	66983,72	0,03	1	3,25	2,91
0,5	66994,22	66952,44	0,06	1	3,25	2,91
0,75	66988,07	66932,09	0,08	1	3,25	2,91
1	66976,41	66897,08	0,12	1	3,25	2,91
1,5	66955,08	66835,77	0,18	1	3,25	2,91
2	66941,74	66800,98	0,21	1	3,25	2,91

Tabla 5-6 Análisis de sensibilidad al criterio de convergencia en el error residual –estado permanente–

Figura 5-14 Criterio de convergencia en el error residual vs. % de error en el balance de masa

Apoyados en los datos de nivelación piezométrica para 16 puntos de observación – targets- localizados en la unidad hidrogeológica U_{123} (Figura 5-15) y graficando los valores de cabezas observadas –No– vs. Cabezas calculadas –Nc– (Figura 5-16), se registra un error medio (Residual mean) de 1 m, un error absoluto (Absolute residual mean) de 2,91 m y una desviación (Residual standard Dev) de 3,25m. La relación de niveles observados vs. Calculados se comporta linealmente, Nc = 0,9536No + 2,0818, con R=0,88. Este resultado es aceptable para considerar que el modelo numérico representa la dinámica y distribución de las cabezas piezométricas promedio del sistema.

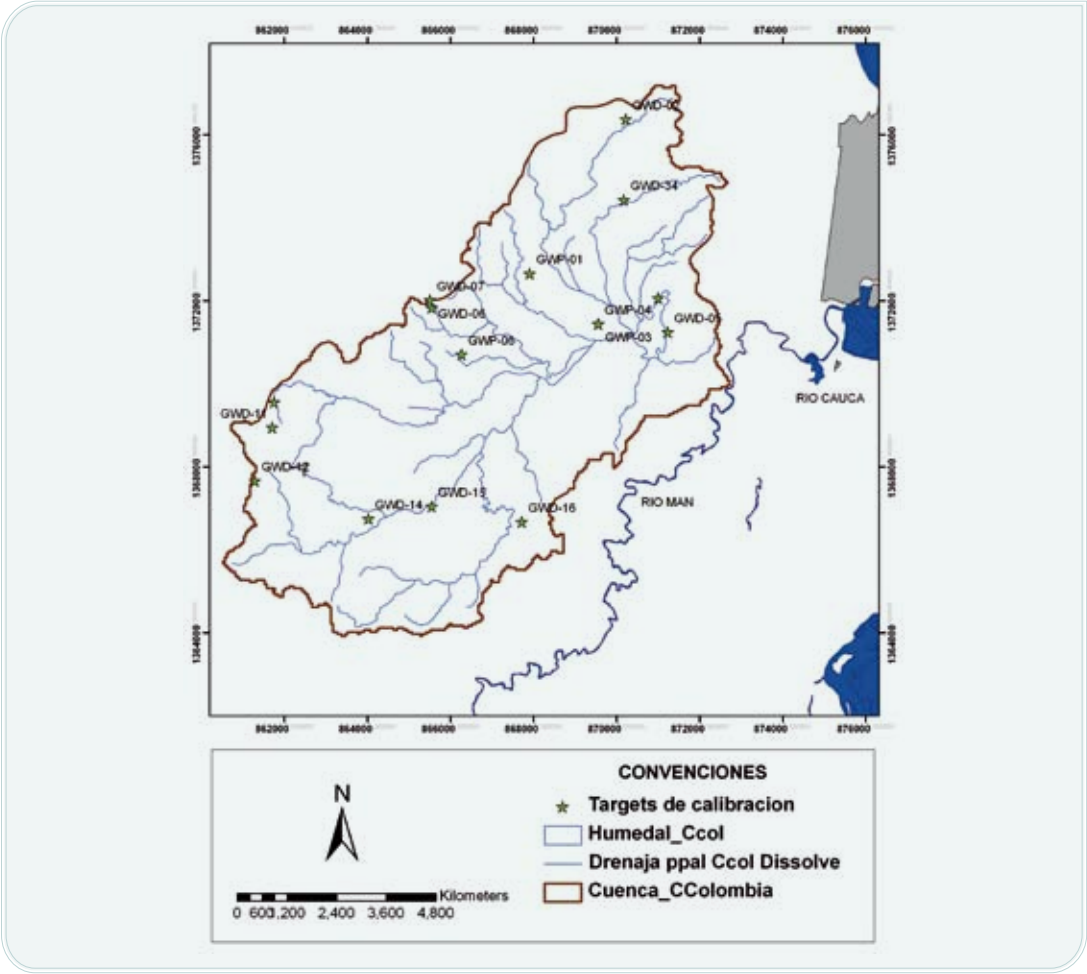


Figura 5-15 Localización de los puntos de observación – targets– en la zona de captura de Ciénaga Colombia

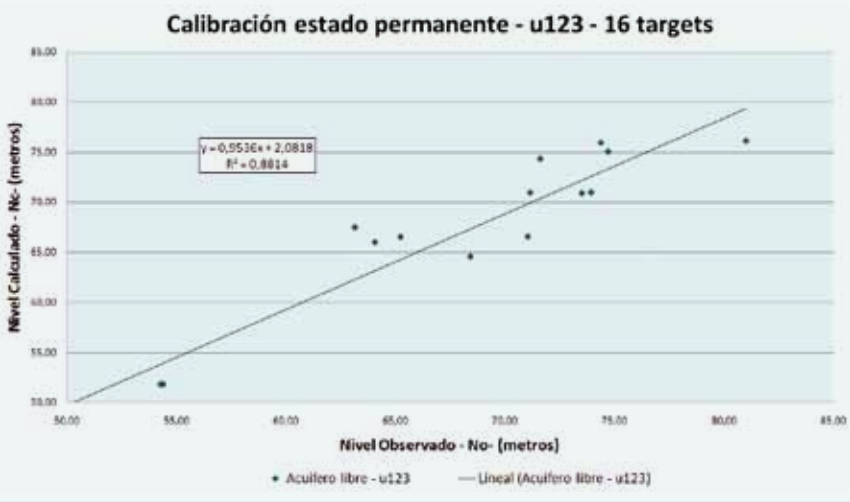


Figura 5-16 Calibración en estado permanente.

Nota: En esta gráfica se comparan los valores de niveles freáticos observados en campo y calculados durante la modelación.

5.5. Análisis de sensibilidad a los parámetros de calibración.

Los datos de conductividad hidráulica horizontal, conductividad vertical y recarga, fueron sometidos a análisis de sensibilidad individual con el propósito de cuantificar los efectos de la incertidumbre en los resultados del modelo calibrado. En cada caso, los valores por parámetro fueron multiplicados sucesivamente por 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 y 2,0. En las Figuras 5-17, 5-18 y 5-19 se sintetizan los resultados de este análisis.

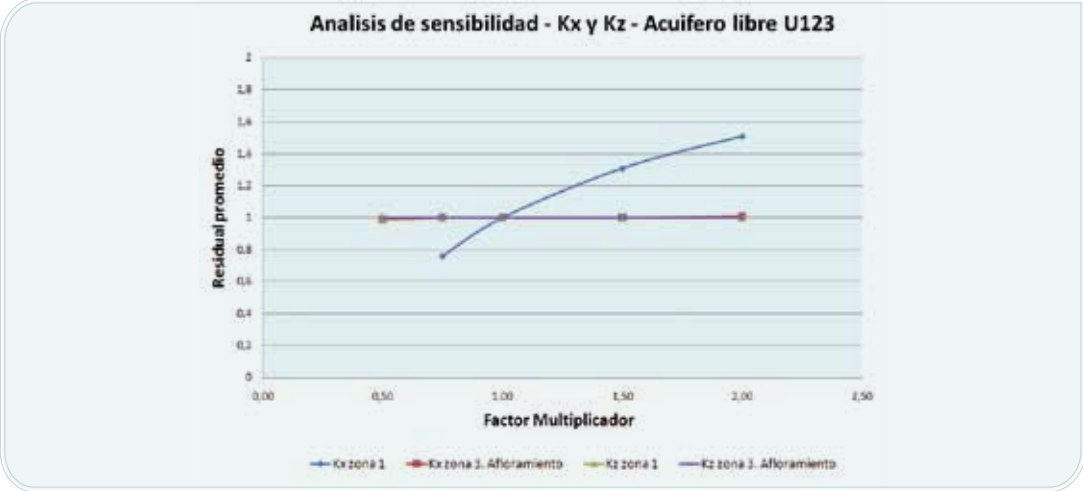


Figura 5-17 Sensibilidad a la conductividad hidráulica horizontal y vertical para el acuífero libre

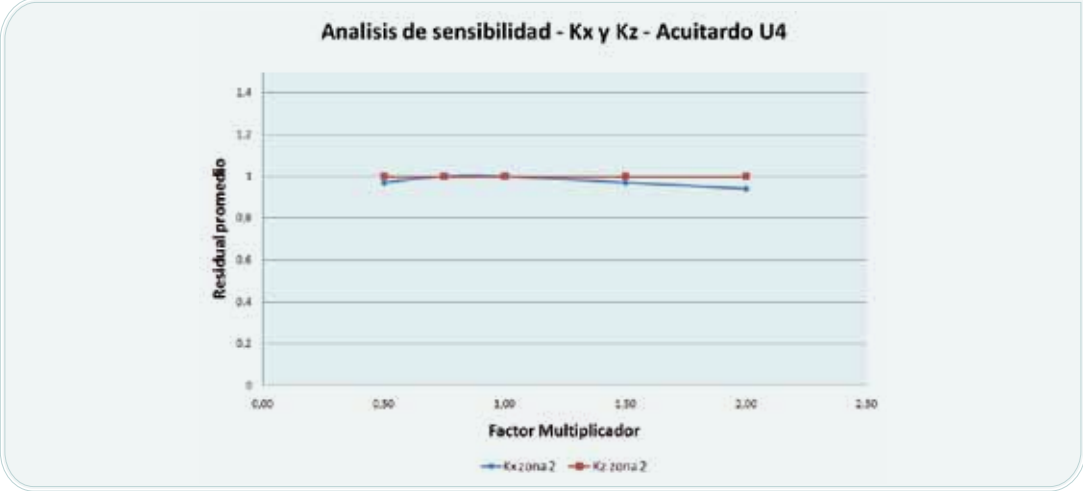


Figura 5-18 Sensibilidad a la conductividad hidráulica horizontal y vertical para el acuitardo

Para el acuífero libre el residual promedio producto del análisis de sensibilidad a la conductividad horizontal no sufre cambios superiores a 0,75 m y la conductividad vertical permanece constante respecto al valor obtenido con el modelo. Lo anterior indica que para este caso en particular, el valor de 0,02 m/d de conductividad vertical

adoptado se ajusta bien a las condiciones hidráulicas de esta unidad hidrogeológica (Figura 5-17). En relación con el acuitardo –U_4– (Figura 5-18), los valores de conductividad horizontal y vertical en general permanecen constantes, con valores cercanos a los resultados del modelo calibrado (Residual Mean=1m).

Figura 5-19 Sensibilidad a la recarga en la zona de captura de Ciénaga Colombia

En lo que a la recarga respecta (Figura 5-19), los mayores efectos de incertidumbre se asocian a la franja central del área de estudio (zona 2 en GV) que comprende la localización del humedal, sin embargo estos valores no superan el rango de 0,75 m de cambio en el residual promedio y tampoco se aprecian efectos sustanciales sobre la configuración de las cabezas hidráulicas en ambas unidades.

A pesar de las limitaciones de información hidráulica para las unidades hidrogeológicas, los resultados obtenidos proporcionan una confianza satisfactoria en relación a la calibración del modelo en estado permanente (Figura 5-20, Figura 5-21, Figura 5-22 y Figura 5-23) y coinciden con los resultados del modelo numérico regional disponible.

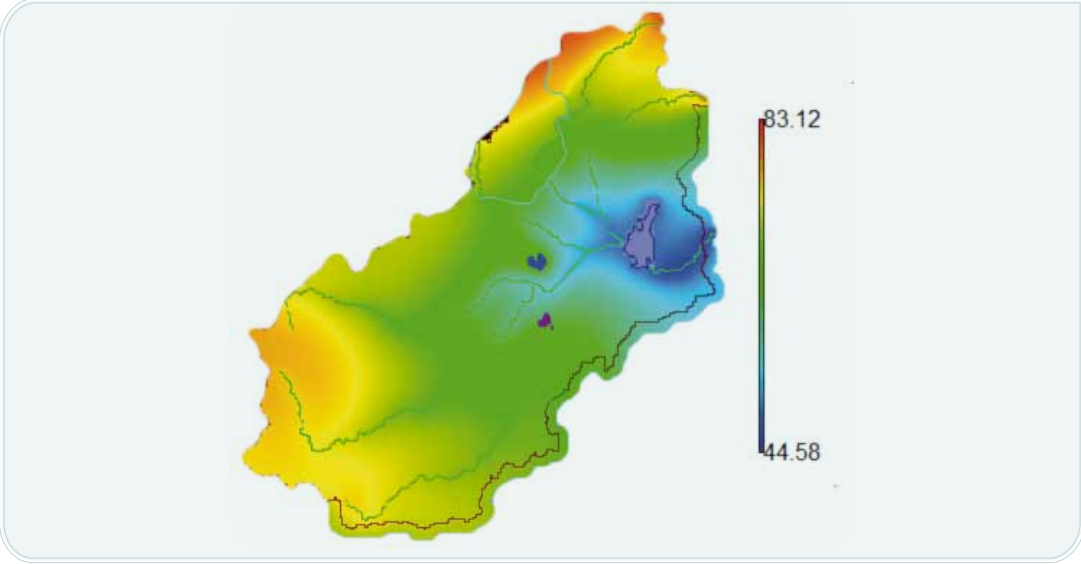


Figura 5-20 Distribución de las cabezas piezométricas en estado permanente

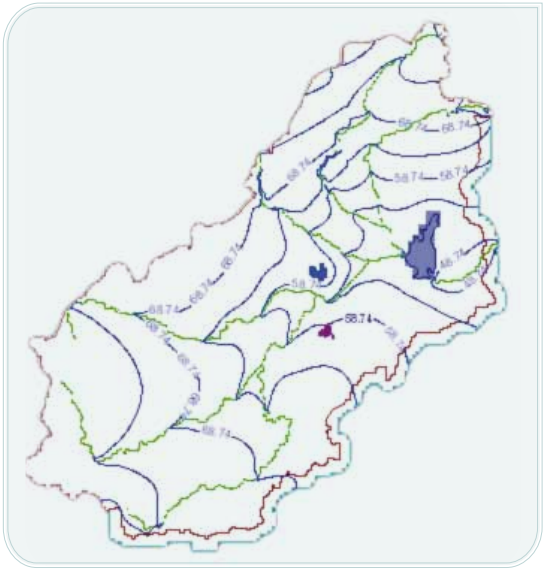


Figura 5-21 Contornos piezométricos en estado permanente

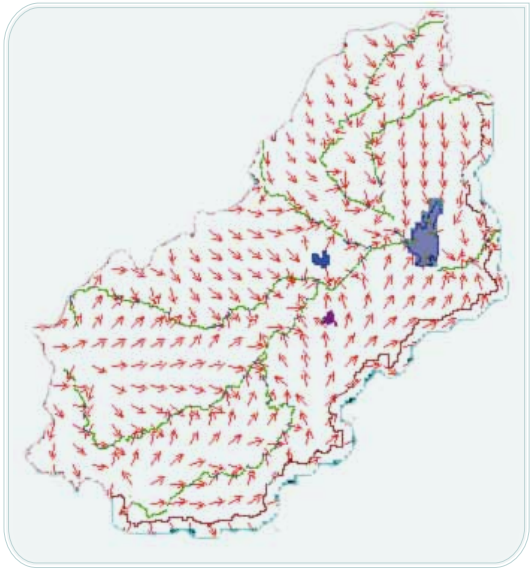


Figura 5-22 Direcciones de flujo en estado permanente

Figura 5-23 Zonas de inundación en estado permanente

5.6. Verificación del modelo en estado permanente

Con el propósito de establecer el grado de confianza del modelo al reproducir un segundo conjunto de datos de campo, se emplearon datos de 15 puntos de observación localizados en el acuífero libre (unidad U_{123}) y que corresponden al valor promedio de nivel piezométrico del año 2009 (Figura 5-24).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso de verificación (Figura 5-25), el modelo calibrado reproduce aceptablemente las condiciones piezométricas

promedio de la zona de estudio. La relación Nc vs. No, arrojó errores bajos y un ajuste lineal con correlación de 0,9; lo que sugiere una buena aproximación del modelo a las condiciones promedio del año 2009 en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

En este punto, puede concluirse que el modelo desarrollado puede usarse como un modelo de simulación, constituyéndose en una valiosa herramienta de predicción de la respuesta del sistema cuando es sometido a presiones de tipo natural o antrópico.

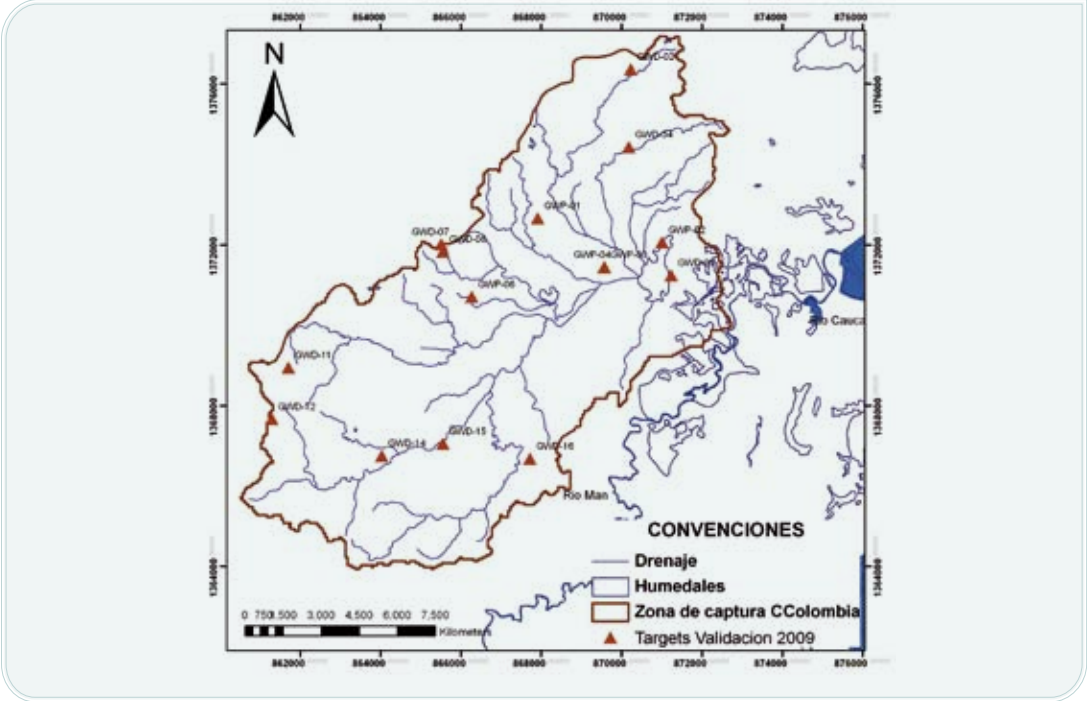


Figura 5-24 Localización de los targets para el proceso de verificación en la zona de captura de Ciénaga Colombia

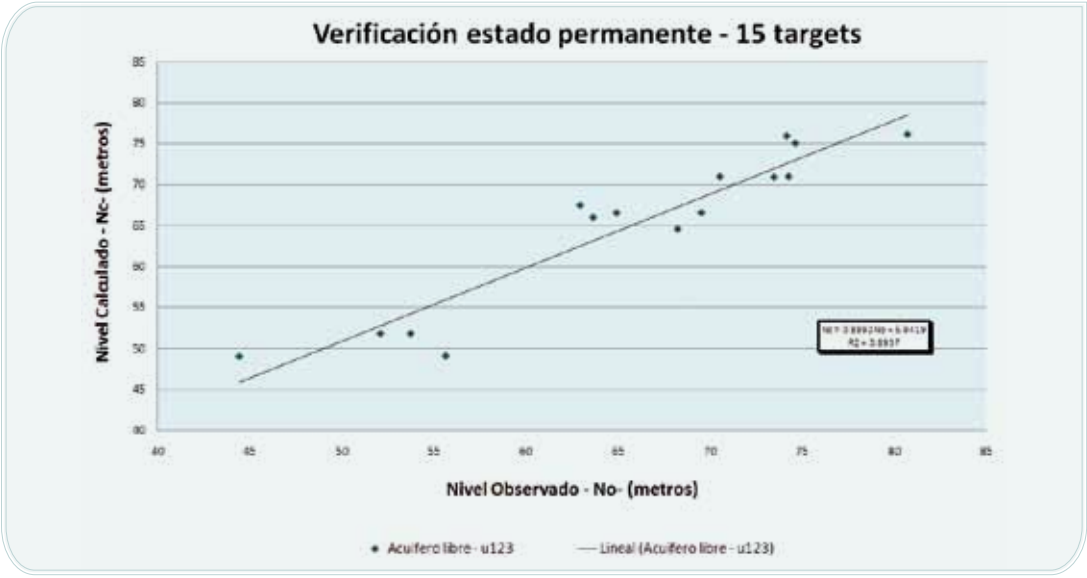


Figura 5-25 Verificación del modelo numérico en estado permanente

5.7. Ejecución y calibración del modelo en estado transitorio

Para la modelación en estado transitorio, los periodos de estrés hidrológico (Tabla 5-7), la selección de un paso de tiempo (7 días), así como las condiciones iniciales y de frontera, fueron definidas para el periodo comprendido entre diciembre 2007 y noviembre 2008, previa calibración del modelo en estado permanente, de acuerdo con las variaciones temporales del comportamiento del nivel piezométrico identificadas en la figura 4-32.

Periodo de simulación -SP-	Duración	Intervalo temporal	Descripción
1	151 días	Diciembre 07 - Abril 08	Máximo descenso del nivel piezométrico
2	123 días	Mayo 08 - Agosto 08	Máximo ascenso del nivel piezométrico
3	91 días	Septiembre 08 - Noviembre 08	Condición ascenso estable

Tabla 5-7 Intervalos de simulación para la modelación en estado transitorio

Teniendo en cuenta las características hidrológicas de cada periodo de estrés se asumieron variaciones en las cabezas para las condiciones de frontera: River, GHB y Lake; y para las zonas de recarga y de evapotranspiración, según los criterios derivados del modelo conceptual y que se sintetizan en las tablas 5-8 y 5-9, respectivamente.

Periodo de simulación	River	GHB U_{123} y U_4
1	Topo + 0,2 m	Head piezo prom. Dic07-Abr08
2	Topo + 0,8 m	Head piezo prom. May08-Ago08
3	Topo + 0,5 m	Head piezo prom. Sep08- Nov08

Tabla 5-8 Variaciones en los valores de cabeza para las condiciones de frontera entre periodos de simulación

Zona	Estación asociada	Recarga (m/d)			ETR	Profundidad de Extinción
		SP1	SP2	SP3	(m/d)	m
1	Piez. La Candelaria	0,0012	0,0014	0,0021	0,00375	0,4
2	Piez. Jalisco	0,0006	0,0016	0,0027	0,00378	
3	Charrascal	0,0034	0,001	0,0006	0,00381	
4	Buenos Aires	0,0036	0,0016	0,0004	0,00384	
5 - Afloramiento	Mitad zona 1	0,0006	0,0007	0,0011	0,00375	

Tabla 5-9 Variaciones en los valores de recarga y evapotranspiración entre periodos de simulación para el estado transitorio

Los parámetros de modelación y los resultados de calibración por ensayo y error para los valores de S_s y S_y se presentan en las tablas 5-10 y 5-11, respectivamente. De acuerdo a los valores reportados en la literatura los resultados obtenidos son aceptables para el estado transitorio.

Parámetro	Valor
Solucionador numérico	PCG2
Máximo número de iteraciones externas - OUTER	250
Máximo número de iteraciones internas - INER	100
Criterio de convergencia en el cambio de cabeza	0,01m
Criterio de convergencia en el error residual	0,5 m^3/d
Tipo de solución para los estados del lago – THETA = 0	Explícito
Número máximo de iteración de Newton – NSSITR	50
Criterio de Convergencia para el lago – SSCNCR	0,01m

Tabla 5-10 Parámetros del método numérico para la solución del modelo en estado transitorio

Unidad acuífera	Coeficiente de almacenamiento especifico –Ss– (L^{-1})	Capacidad especifica –Sy– o porosidad efectiva
U_{123}	0,01	0,1
U_4	0,007	0,05

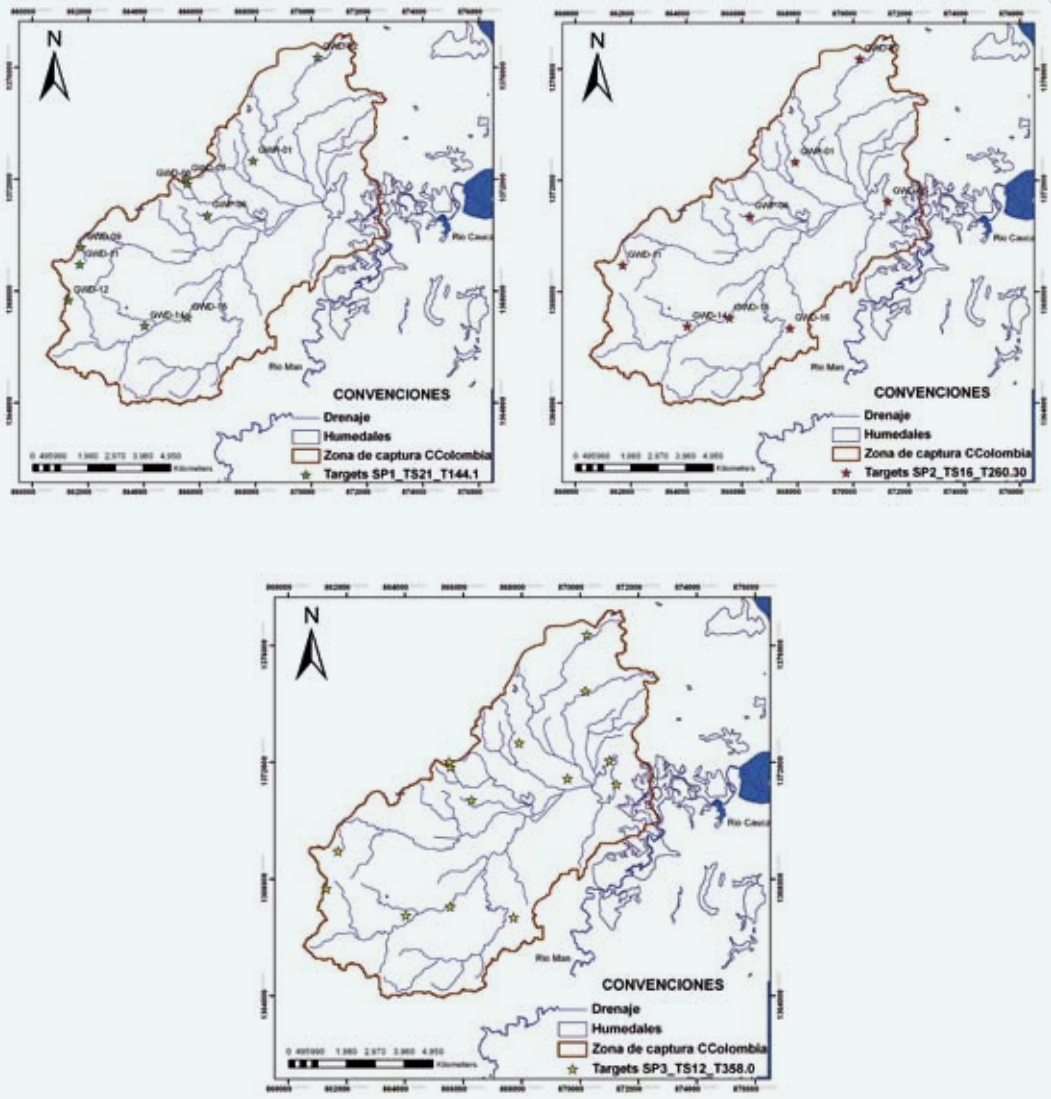
Tabla 5-11 Condiciones de almacenamiento para el estado transitorio en cada una de las unidades hidrogeológicas

El análisis de los valores de cabezas observadas vs. calculadas se realizó seleccionando el paso de tiempo que corresponde a una variación importante en los valores de nivel freático y para el que además se contaba con información para el mayor número de puntos de observación (Tabla 5-12 y Figura 5-26).

Periodo de Stress SP	Paso de Tiempo TS	Tiempo T (días)	Descripción del TS (mm/dd/aa)	Fecha de Monitoreo (mm/dd/aa)	No. Targets
1	21	144.1	4/24/2008	4/22/2008 4/24/2008	10
2	16	260.3	8/16/2008	8/15/2008 8/18/2008	8
3	12	358	11/22/2008	11/24/2008 11/25/2008 11/26/2008	15

Tabla 5-12 Puntos de observación –targets– por periodo de estrés hidrológico

Los errores de calibración y las relaciones entre las cabezas observadas y calculadas, se sintetizan en la tabla 5-13 y figura 5-27.



a) SP1 TS21 – Abril 2008 b) SP2 TS16 – Agosto 2008
c) SP3 TS12 – Noviembre 2008

Figura 5-26 Localización de los puntos de observación para los periodos de estrés hidrológico

SP	TS	T (días)	Residual mean	Residual Standard Dev.	Absolute Residual Mean	Relación lineal
1	21	144	-0,88	3,06	2,68	Nc = 0,5858No + 30,115 R^2 = 0,72
2	16	260	1,49	3,23	2,56	Nc= 1,2158No – 16,332 R^2 = 0,85
3	12	358	0,76	2,95	2,2	Nc = 0,9726No + 1,0613 R^2 = 0,90

Tabla 5-13 Errores de calibración y relaciones entre los valores calculados y observados en estado transitorio

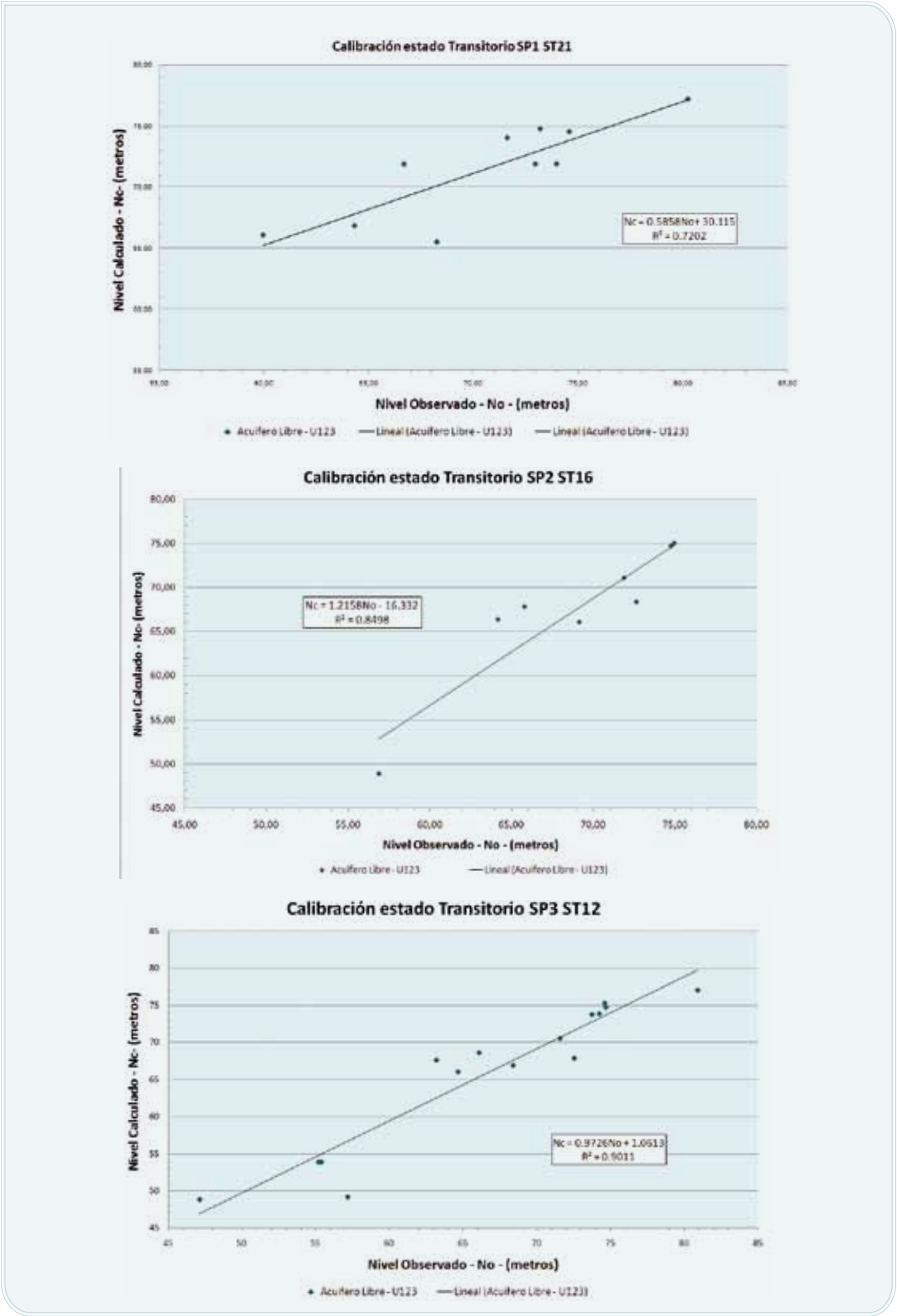
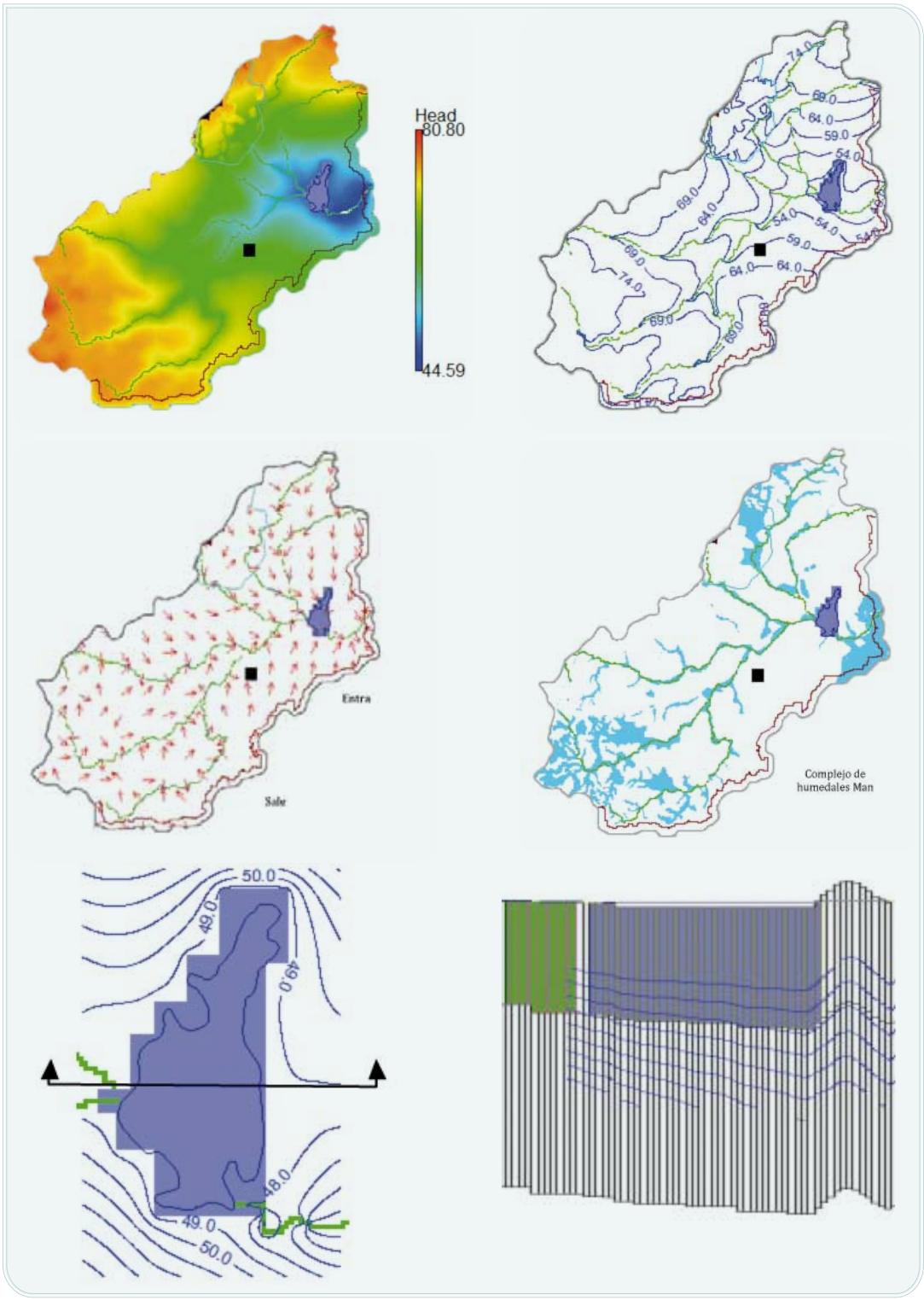
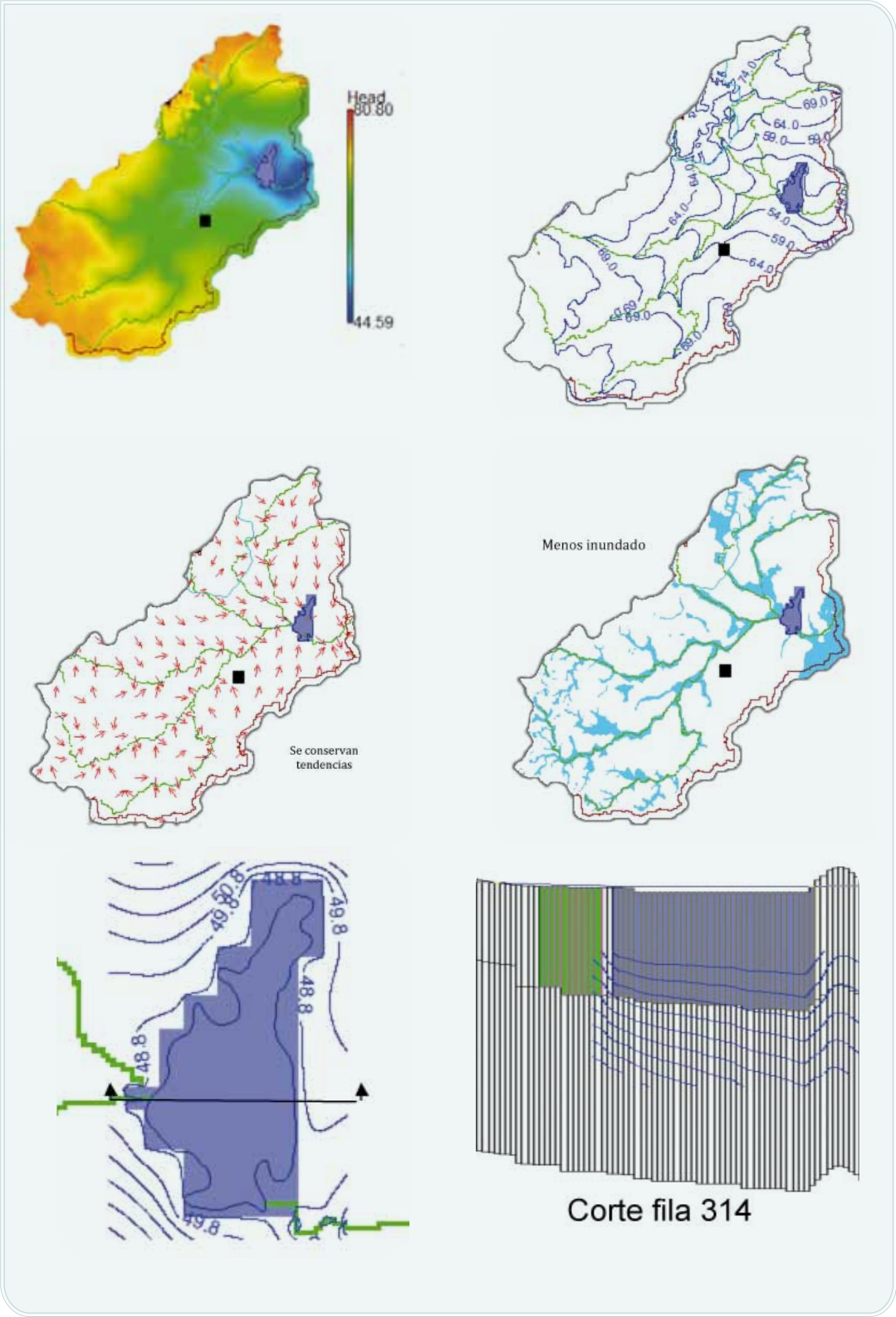


Figura 5-27 Relación cabezas observadas vs. Calculadas en estado transitorio

En la figura 5-28, se muestran los resultados gráficos de la variación de los niveles piezométricas en cada periodo de estrés hidrológico.



Periodo de estrés hidrológico 1. SP1_TS21_T144.1 corresponde al 24 de abril de 2008



Periodo de estrés hidrológico 3. SP3_TS12_T358 corresponde al 24 de noviembre de 2008

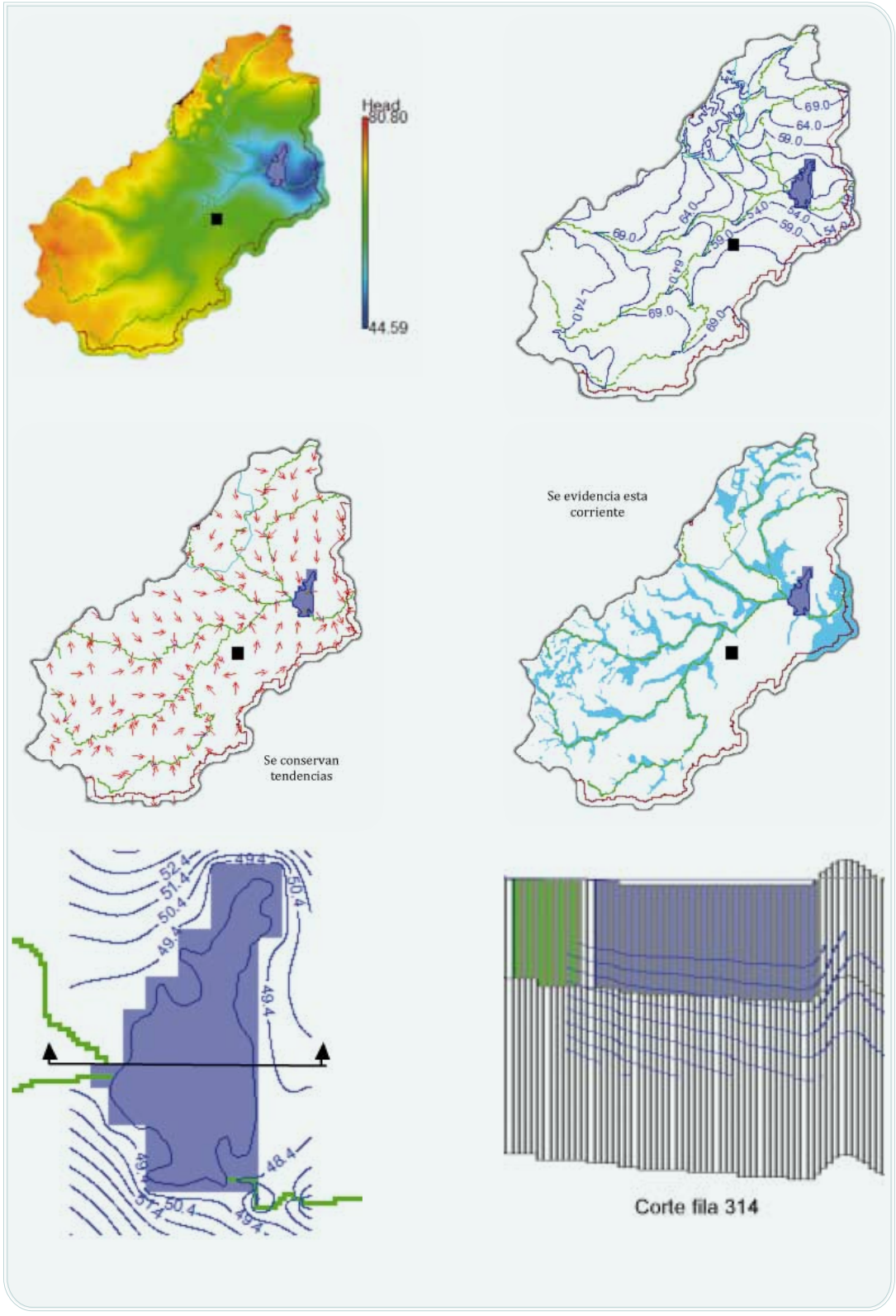


Figura 5-28 Distribución de cabezas piezométricas por periodo de estrés hidrológico

5.8. Simulación de escenarios para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia

Para evaluar la respuesta de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia ante la posible presión por eventos naturales o antrópicos, se plantearon cuatro (4) escenarios teniendo en cuenta las condiciones actuales y la importancia económica, ambiental y turística de este ecosistema.

El primer escenario evalúa la dinámica actual de explotación de agua subterránea en la zona de estudio y desde éste se plantean los demás escenarios de carácter hipotético para evaluar: i) las implicaciones por el aumento futuro de las demandas de agua, ii) extracciones puntuales de agua subterránea para turismo y abastecimiento doméstico y por último, iii) las reducciones en los niveles de agua del acuífero y del humedal por efecto del cambio climático. En resumen, quiere evaluarse ¿Cuál es el efecto sobre la ciénaga y sobre el acuífero en cada uno de los escenarios?

Escenario 1. Dinámica extractiva del agua subterránea en la zona de captura de Ciénaga Colombia.

La extracción de agua subterránea es principalmente para abastecimiento doméstico. No todas las captaciones tienen bomba de extracción, en algunas de ellas se realiza de forma artesanal. Se han identificado un total de 11 puntos de extracción que representan la totalidad de las demandas actuales de cada zona aferente.

Escenario 2. Proyecto turístico.

Se emprende un proyecto turístico en Ciénaga Colombia donde se espera tener visitantes ocasionales durante fines de semana y vacaciones. El número de visitantes podría ascender a 850 personas por día. Para su abastecimiento se construirá una captación de aguas subterráneas de la cual se bombearán 170 m^3/día. Ésta estará localizada a una distancia de 230 m del humedal, en cumplimiento de criterios que permitan reducir los costos de excavación por menor profundidad del nivel freático y la mayor capacidad del acuífero, en términos de mayor espesor saturado para asegurar la oferta de agua. Este punto corresponde a terrenos cercanos a la zona norte del humedal, donde se tiene acceso por vía terrestre y fluvial.

Escenario 3. Proyecto abastecimiento de agua.

La Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios del municipio de Caucasia presta el servicio de acueducto en el área urbana a través de una bocatoma superficial localizada en la cuenca del río Man y mediante cinco (5) pozos de captación de agua subterránea. Estas captaciones logran abastecer el 92% de la población con un servicio que no tiene continuidad las 24 horas del día. La ESP desea prestar el servicio a la totalidad de suscriptores para lo cual decide construir una captación subterránea en la zona de captura, lo más cercana posible al casco urbano del municipio y donde las condiciones hidrogeológicas permitan un caudal de explotación continuo de 1.200 m^3/d (abastecimiento para 6.415 habitantes).

Escenario 4. Cambio climático

Bajo un panorama de cambio climático, el IDEAM ha proyectado una disminución significativa de la precipitación en los próximos 50 años en las siguientes regiones eco-climáticas: Medio cauca – Alto Nechí (-6%) y Alto Magdalena (-7%) (Mejía y CORANTIOQUIA, 2008), lo cual repercutiría en la disminución de la recarga directa como principal fuente de sostenibilidad para el acuífero y para el humedal.

5.8.1. Resultados Escenario 1. Dinámica extractiva del agua subterránea en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia

Se definieron once (11) puntos de extracción de agua subterránea distribuidos en la zona de estudio como fronteras tipo Well (Figura 5-29) con caudales que corresponden a la demanda doméstica, agrícola y pecuaria de la población asentada en la cuenca, que aproximadamente equivale a 1000 habitantes localizados principalmente en el corregimiento de Santa Rosita al suroccidente de la zona de captura. La demanda diaria de agua es de 192 m^3/d (Tabla 5-14). Los resultados comparativos por periodo de estrés para la modelación transitorio con y sin bombeo se muestran en la figura 5-30.

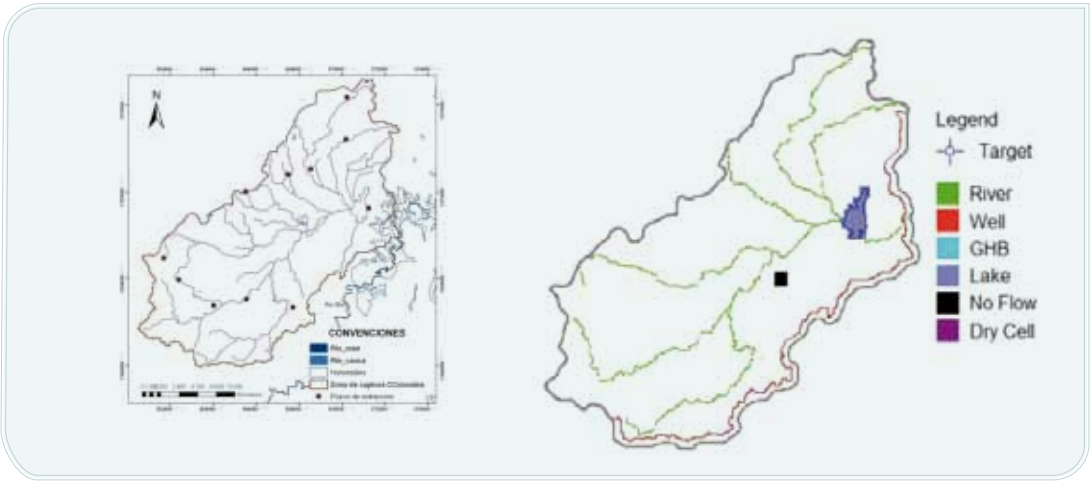
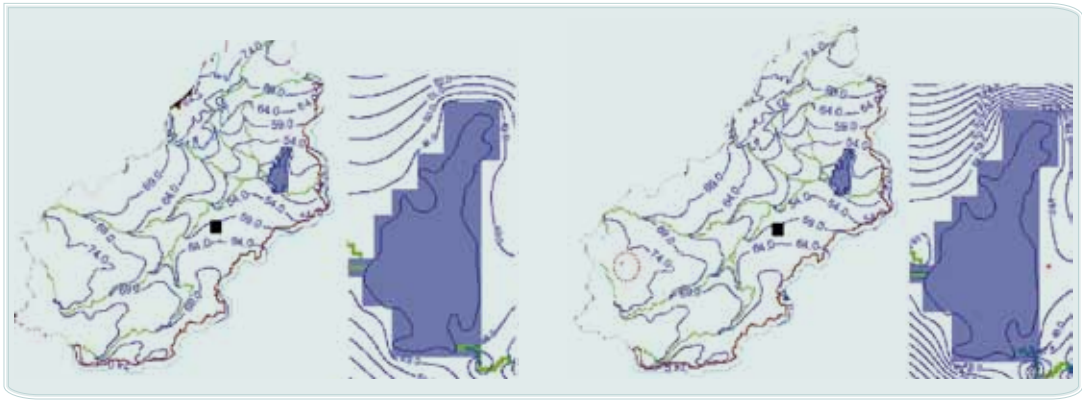


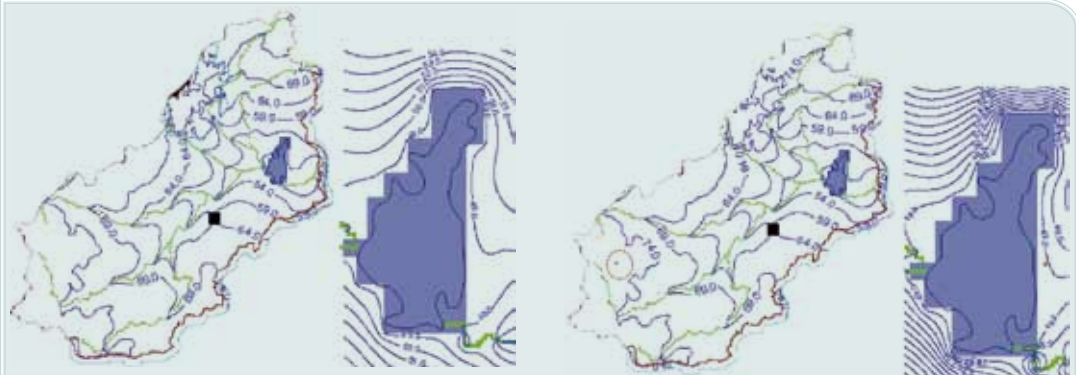
Figura 5-29 Localización de puntos de extracción de agua subterránea en la zona de captura de Ciénaga Colombia (Fronteras tipo BCS Well en GV)

Captación	Habitantes	Caudales de extracción (m^3/d)
Jerusalén, Charrascal, Topacio, Rancho Alegre, Porvenir, La Dinastía, Costa Rica, Candelaria, Jalisco, La Siberia	200	40
Santa Rosita	760	152
TOTAL	**960**	**192**

Tabla 5-14 Estimación de caudales de extracción en la zona de captura de Ciénaga Colombia



Periodo de estrés hidrológico 2. SP1_TS21_T144. Sin bombeo (izq), con bombeo (der).



Periodo de estrés hidrológico 2. SP2_TS16_206. Sin bombeo (izq), con bombeo (der).

Periodo de estrés hidrológico 3. SP3_TS12_T358. Sin bombeo (izq), con bombeo (d

Figura 5-34 Distribución cabezas piezométricas con y sin bombeo en la zona de captura de Ciénaga Colombia

Los resultados evidencian que las tasas de bombeo actual no afectan el acuífero con respecto a la configuración espacial y la magnitud de los niveles piezométricos, se realizó un análisis afectando los caudales de explotación por factores multiplicadores de 10 y 100; asociado a un incremento en la demanda por crecimiento poblacional o uso agropecuario, las cuales evidenciaron que con un aumento de la demanda actual en dos órdenes de magnitud, el nivel de agua en el humedal se vería disminuido entre 3 y 5 cm de profundidad a lo largo del periodo de simulación. Este descenso representa una extracción de hasta 28.500 m^3 de agua en el humedal (Tabla 5-15). Sin embargo, bajo este panorama, las distribuciones promedio de nivel piezométrico no sufren cambios importantes en su configuración espacial, salvo la presencia de superficies de abatimiento asociadas al radio de influencia de los pozos localizados al sur y suroccidente de la cuenca, evidenciados principalmente en los escenarios de proyección de demanda. El pozo de Santa Rosita registra descensos que oscilan entre 0,9 y 7m entre las simulaciones propuestas (Figura 5-31).

SP	TS	T (días)	Nivel CC demanda (m)	Nivel CC Demanda x 10 (m)	Nivel CC Demanda x 100 (m)	Descenso Nivel Demanda x 10 (m)	Descenso Nivel Demanda x 100 (m)	Volumen Agua CC (m^3)	Área Superficial CC (m^2)	Volumen extraído de CC Dda x 10 (m^3)	Volumen extraído de CC Dda x 100 (m^3)
1	21	144,1	48,5555	48,5528	48,5257	0,0027	0,0298	1.072.186	521.618	1.408	15.544
2	16	260,3	48,6787	48,6746	48,6334	0,0041	0,0453	1.152.512	528.991	2.169	23.963
3	12	358	48,8455	48,8407	48,7925	0,0048	0,053	1.261.266	537.739	2.581	28.500

*CCol: humedal Ciénaga Colombia

Tabla 5-15 Resultados de nivel de agua en el humedal por aumento de la demanda

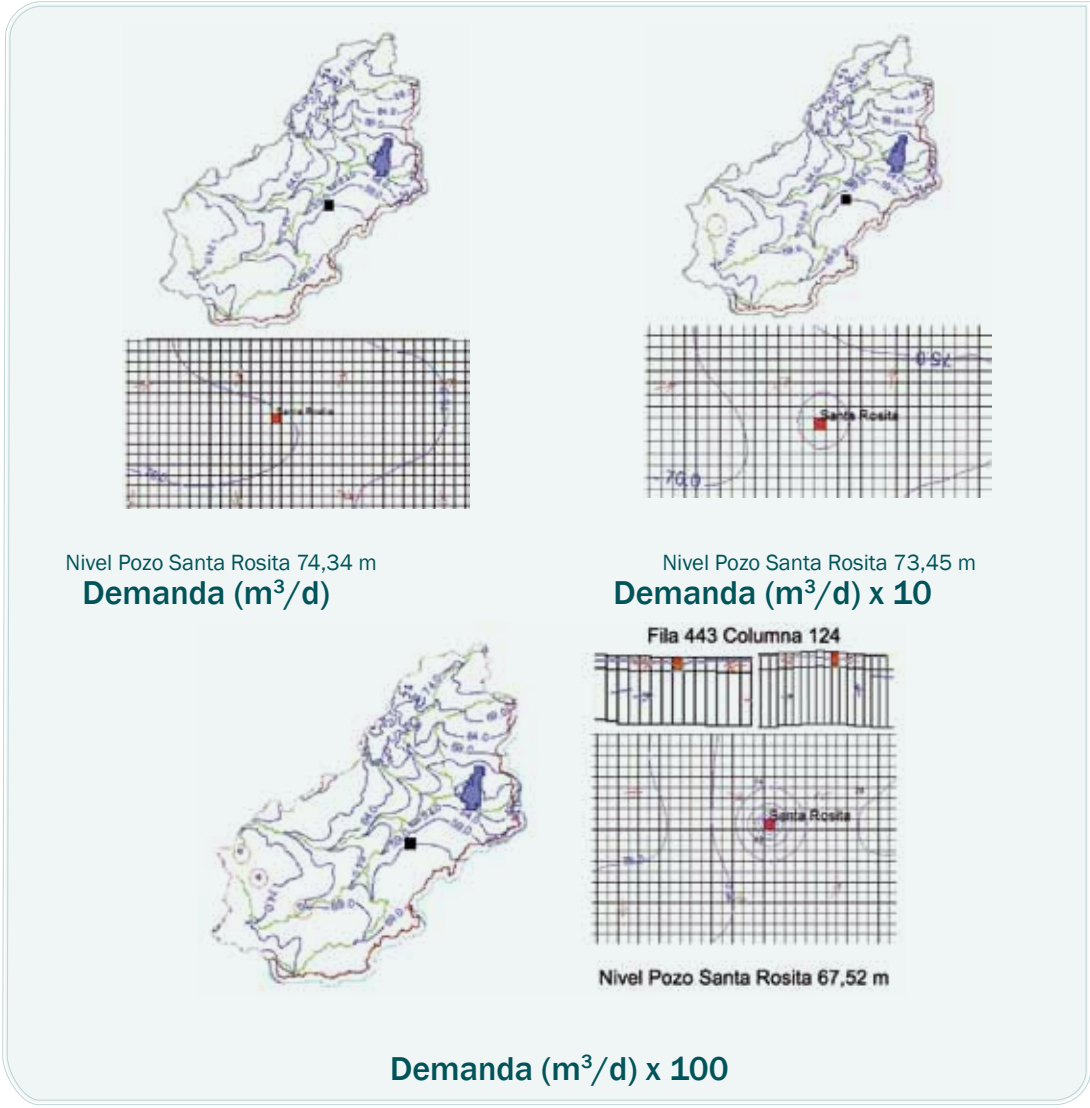


Figura 5-31 Distribución de las cabezas piezométricas por aumento en la demanda en la zona de captura de Ciénaga Colombia

5.8.2. Resultados Escenario 2. Proyecto turístico

El proyecto turístico se construirá a una distancia de 230 m del humedal (Figura 5-32), en cumplimiento de condiciones hidrogeológicas que representen la menor profundidad del nivel freático y el mayor espesor saturado del acuífero (Figura 5-33).

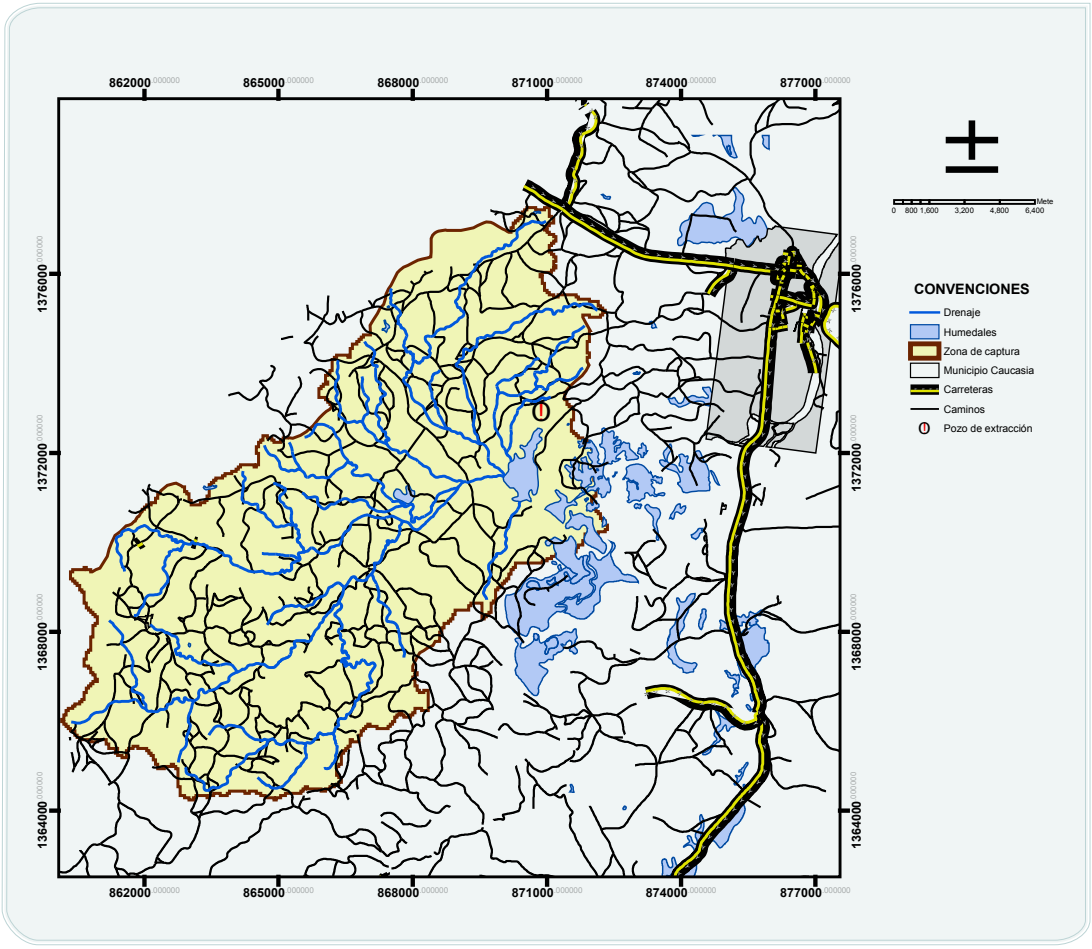
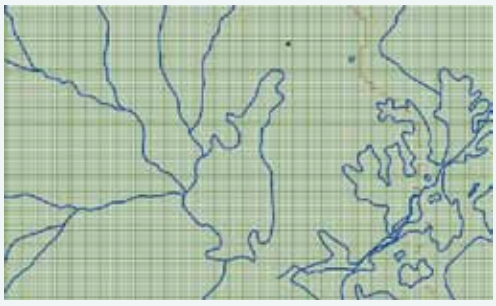
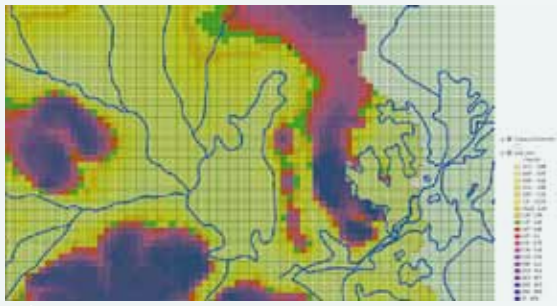


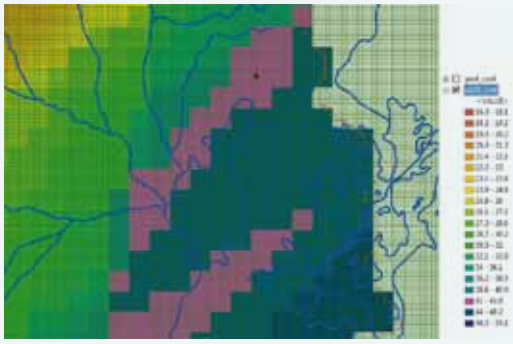
Figura 5-32 Localización de los puntos de extracción para abastecimiento turístico.



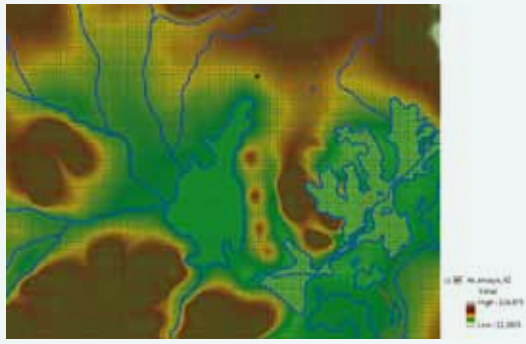
Localización del pozo de producción (celda: fila 262, columna 480)



Análisis de profundidad de excavación (Prof=Topo-NF)



Análisis de espesor de la unidad acuífera (U123)

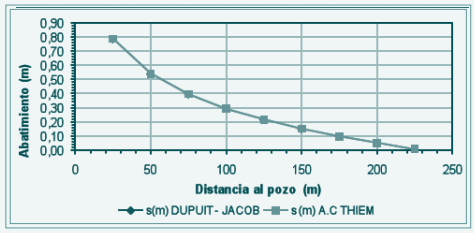


Análisis de las condiciones del terreno (MDE)

Figura 5-33 Análisis de las condiciones hidrogeológicas para la localización del pozo de producción doméstico en la zona de captura de Ciénaga Colombia

Para identificar un lugar óptimo para la zona turística y para la construcción del pozo de agua subterránea; se realizó un análisis de las condiciones de abatimiento en el acuífero libre por acción extractiva de agua subterránea y su posible implicación en los niveles del humedal. Se calcularon los abatimientos del pozo para distancias radiales evaluadas cada 25 m hasta la distancia máxima al humedal de 230 m (Tabla 5-16).

ESTADO MODIFICADO (Con bombeo)			
W (recarga)	0,00036		m/d
Caudal de extracción Q	170		m³/d
Radio de influencia R	230		m
Conductividad hidráulica K	2		m/d
Cota pozo	57,27		m.s.n.m
Delta x	25		m
Gradiente i (condición estática)	0,012		m/m
Tiempo de bombeo t	1		día
Parámetros Acuífero libre - Unidad U123			
Espesor del acuífero	d	38,52	m



Conductividad Hidráulica	k	2	m/d
Porosidad eficaz (S libre)	n	0,1	
Transmisibilidad	T	77,04	m²/d
Caudal de extracción	Q	170	m³/d
Radio del pozo	rp	0.5	m

		SIN RECARGA							CON RECARGA UNIFORME						
r (m)	Ho (m)	Hp (m)	s(m) DUPUIT JACOB	s (m) THIEM	Cotas originales	Cotas abatidas	Superficie de goteo H´ (Ehrenberger)	Cota real abatimiento	Hp(m)	s(m)	Para s<<Ho; s (m)	Cotas originales	Cotas abatidas	H´	Cota real abatimiento
25	39	37,7	0,8	0,8	57,57	56,8	0,0082	56,8	37,7	0,8	0,7	57,57	56,7	0,0091	56,7
50	39	38	0,5	0,5	57,87	57,3	0,0038	57,3	37,9	0,6	0,4	57,87	57,3	0,0044	57,3
75	39	38,1	0,4	0,4	58,17	57,8	0,0021	57,8	38,1	0,4	0,3	58,17	57,7	0,0024	57,7
100	39	38,2	0,3	0,3	58,47	58,2	0,0011	58,2	38,2	0,3	0,2	58,47	58,1	0,0014	58,1
125	39	38,3	0,2	0,2	58,77	58,6	0,0006	58,6	38,3	0,2	0,1	58,77	58,5	0,0008	58,5
150	39	38,4	0,2	0,2	59,07	58,9	0,0003	58,9	38,3	0,2	0,1	59,07	58,9	0,0004	58,9
175	39	38,4	01	0,1	59,37	59,3	0,0001	59,3	38,4	0,1	0	59,37	59,3	0,0002	59,3
200	39	38,5	0	0	59,67	59,6	0	59,6	38,5	0,1	0	59,67	59,6	0	59,6
225	39	38,5	0	0	59,97	60	0	60	38,5	0	0	59,97	60	0	60
250	39	38,5	0	0	60,27	60,3	0	60,3	38,6	0	0	60,27	60,3	0	7

Nota: Fórmula de Dupuit-Forcheimer (en régimen permanente) con corrección por superficie de goteo (Ehrenberger), con y sin recarga del acuífero.

Tabla 5-16 Abatimiento teórico para el acuífero libre por la acción del pozo de producción

Los cambios en el nivel de agua del humedal Ciénaga Colombia por efecto del bombeo desde el pozo turístico en cada periodo de estrés hidrológico se presentan en la tabla 5-17. Los resultados muestran que el humedal pierde un volumen de agua que oscila entre 4.200 y 9.000 m³ correspondiente a un descenso de nivel que varía entre 0,8 y 2 cm. Estos resultados resultan ser poco impactantes al analizar las profundidades de agua registradas en el humedal, así como la distribución de las cabezas piezométricas en la zona de captura y en las inmediaciones del humedal Ciénaga Colombia (Figura 5-34).

SP	TS	T (días)	Nivel CC Demanda (m)	Cota nivel CC Bombeo pozo Turismo (m)	Descenso de agua (m)	Profundidad del agua en CC Pozo Turismo (m)	Vol extraído de agua en CC (m³)
1	21	144,1	48,5555	48,5473	0,0082	2,05	4.277
2	16	260,3	48,6787	48,665	0,0137	2,17	7.247
3	12	358	48,8455	48,8288	0,0167	2,33	8.980

Tabla 5-17 Niveles de agua en el humedal por efecto del bombeo en cada periodo de estrés hidrológico

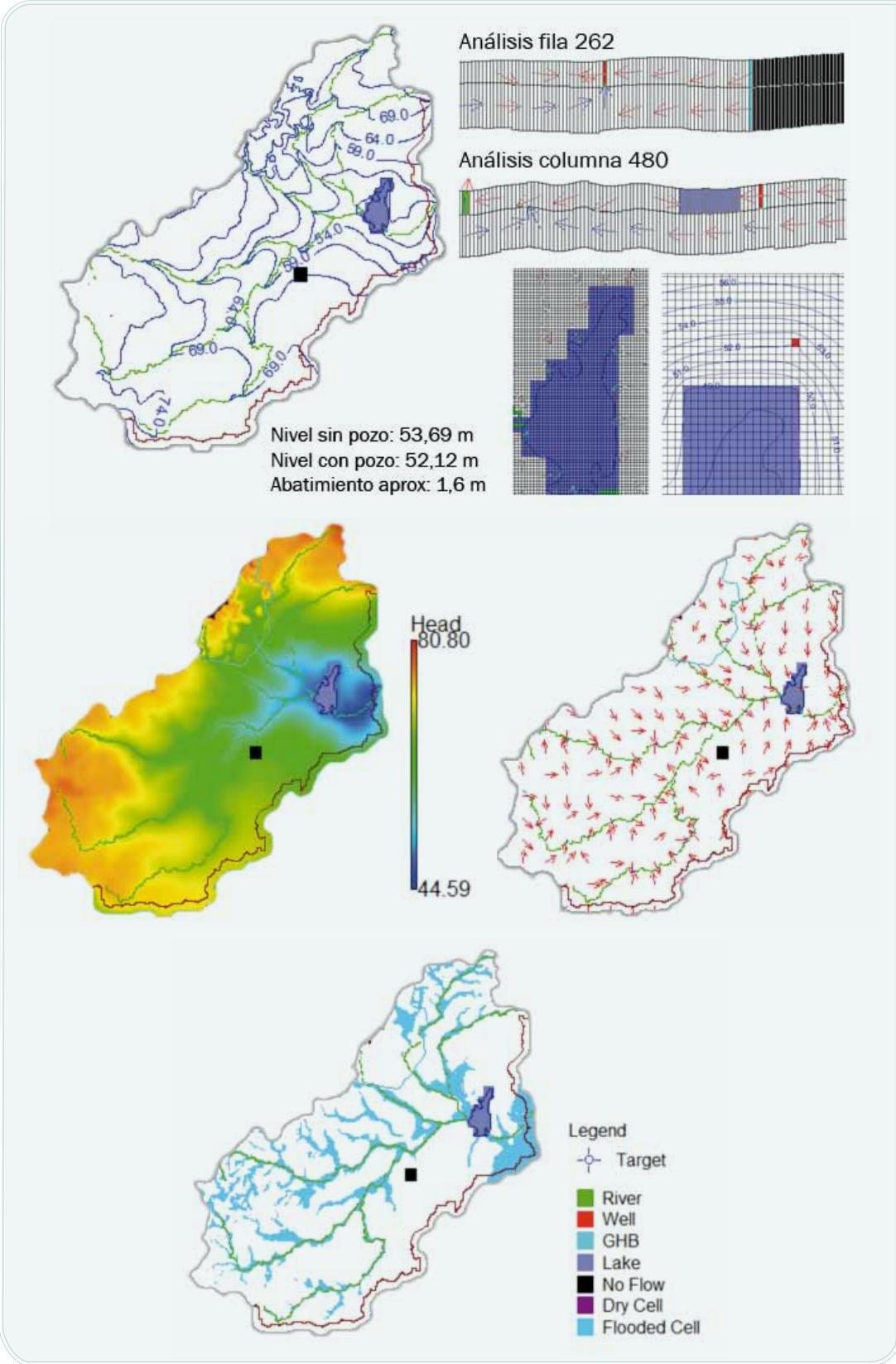


Figura 5-34 Resultados distribución de cabezas piezométricas en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Escenario 2 (SP3_TS_12_358)

Figura 5-35 Nivel piezométrico calculado con y sin bombeo para un punto de monitoreo cercano a al pozo de producción turístico

Los cambios en el nivel piezométrico a lo largo del periodo de simulación para un punto de observación cercano al pozo de extracción (Figura 5-35), confirma la baja afectación del sistema en términos de cambios en los niveles de agua subterránea.

5.8.3. Resultados Escenario 3. Proyecto abastecimiento de agua

El pozo de producción para abastecimiento doméstico de agua estará localizado lo más cerca posible al casco urbano del municipio y donde las condiciones hidrogeológicas permitan la extracción de un caudal continuo de 1.200 m^3/d (Figura 5-36 y Figura 5-37).

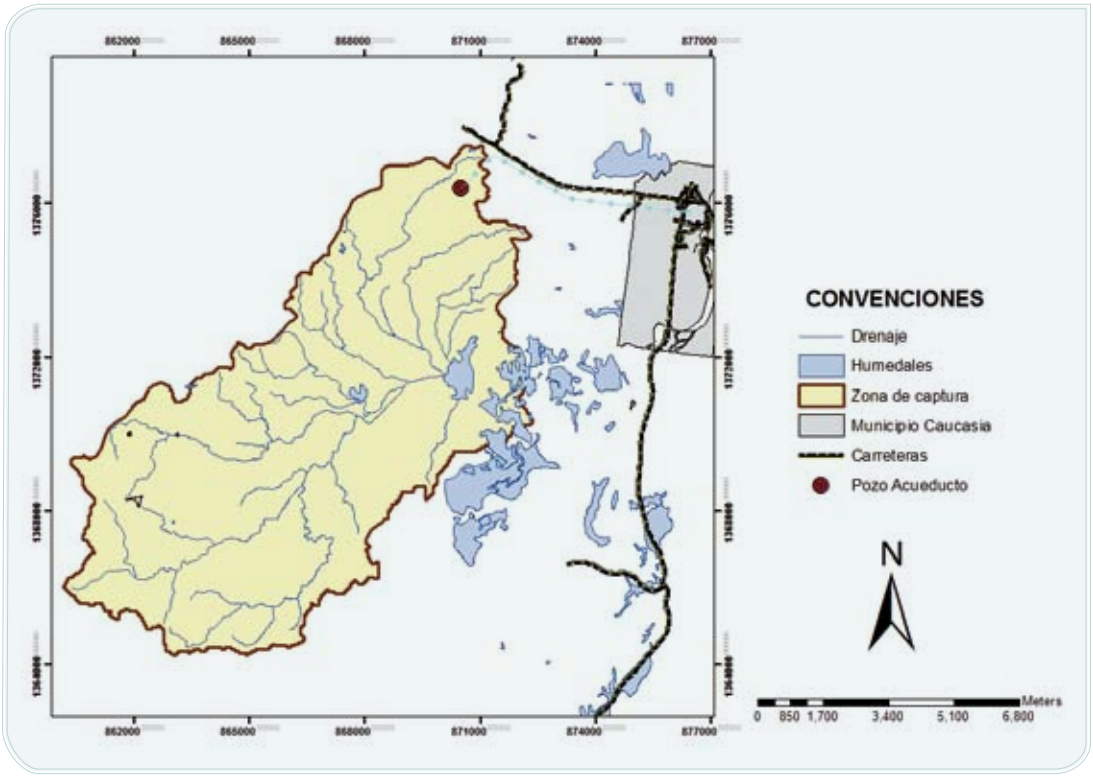
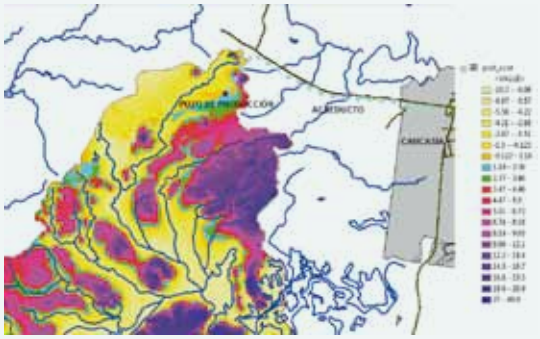
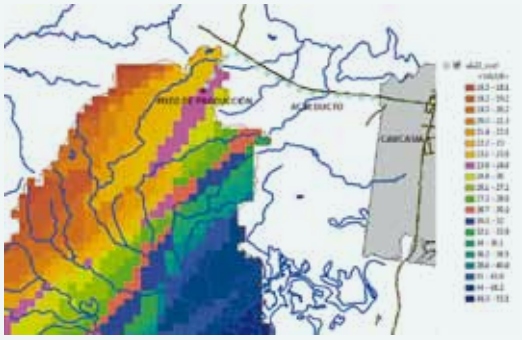


Figura 5-36 Localización del punto de extracción para abastecimiento del acueducto de Caucasia

Localización del pozo de extracción
(celda: fila 117, columna 468)



Análisis de profundidad de excavación



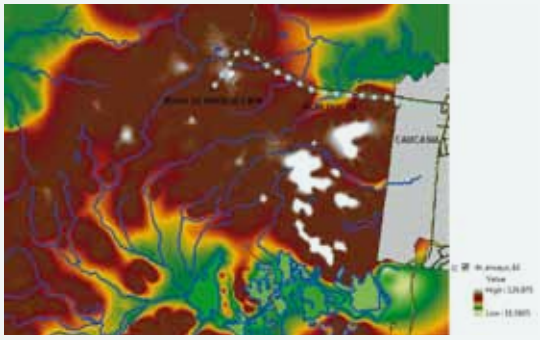


Figura 5-37 Análisis de las condiciones hidrogeológicas para la localización del pozo para abastecimiento del acueducto del municipio de Caucasia

En la tabla 5-18, se aprecia que los niveles de agua del humedal y la distribución espacial de las cabezas del acuífero en la zona de captura no se ven afectados por el bombeo (Figura 5-38) sin embargo al analizar con detalle los resultados alrededor del pozo, se identifica que el caudal de explotación cargado a un solo pozo ocasiona el abatimiento total del acuífero en ese punto (secado de la celda que lo representa). Por lo tanto, se definió modelar el sistema de abastecimiento doméstico como una batería de seis (6) pozos en la que continuamente se extrae un caudal de explotación de 200 m^3/d.

SP	TS	T (días)	Nivel CC Demanda (m)	Nivel CC bombeo abastecimiento (m)
1	21	144,1	48,5555	48,5558
2	16	260,3	48,6787	48,6791
3	12	358	48,8455	48,846

* CC: Humedal Ciénaga Colombia

Tabla 5-18 Niveles de agua en el humedal por efecto del bombeo del pozo de abastecimiento

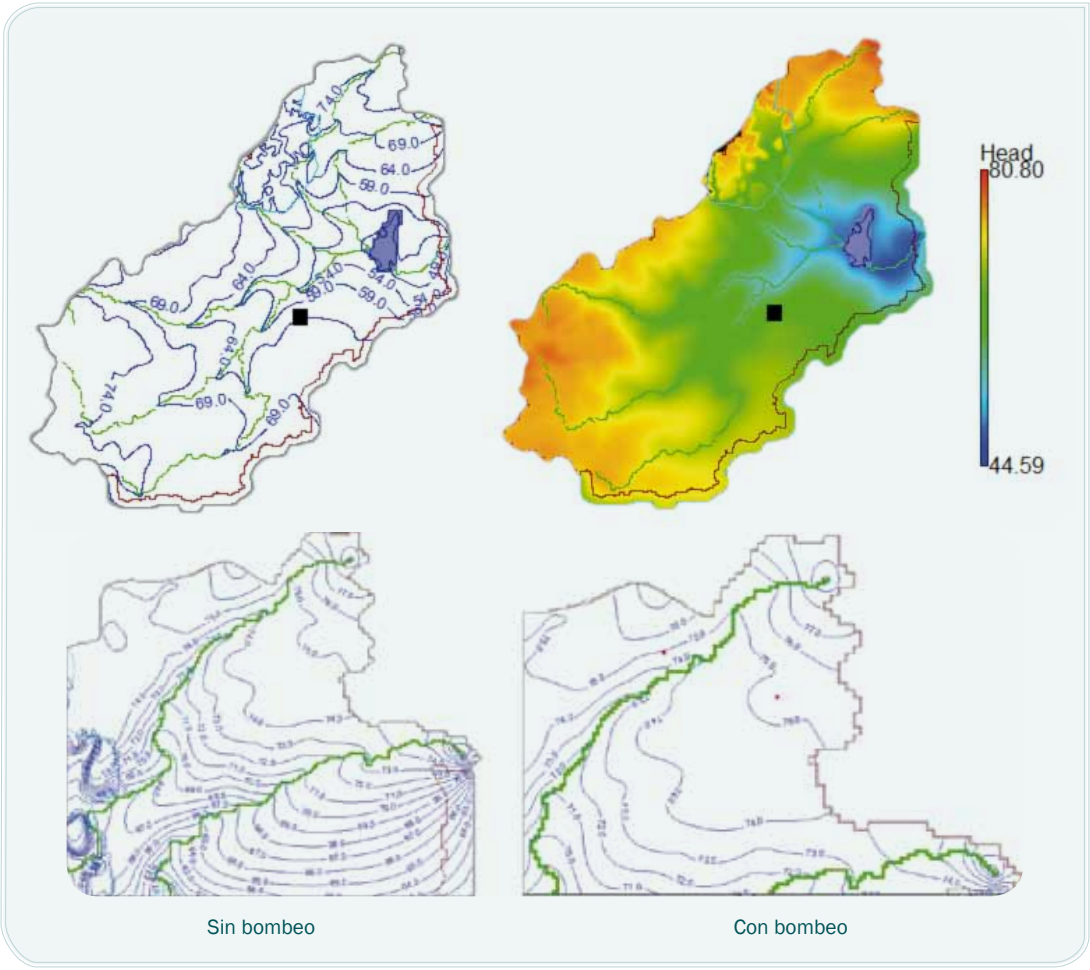


Figura 5-38 Resultados distribución de cabezas piezométricas en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Escenario 3 (SP3_TS_12_144)

En la Tabla 5-19 y la Figura 5-39, se observan los resultados de abatimiento en la superficie piezométrica por efecto de la batería de pozos al final del periodo de simulación. Sin llegar al abatimiento total, se aprecian descensos de hasta 17 m con respecto al sistema inicial. No obstante, no se presentan efectos marcados en la distribución espacial de las cabezas en la zona de captura, salvo la presencia de los contornos de abatimiento individuales en las inmediaciones del pozo.

SP	TS	T (días)	Fila	Columna	Cota sin bombeo (m)	Cota con bombeo (m)	Abatimiento (m)
3	13	365	117	467	75,25	61,89	13,36
			117	468	75,25	61,35	13,9
			118	467	75,25	58,59	16,66
			118	468	75,25	58,59	16,66
			119	467	75,25	60,69	14,56
			119	468	75,25	60,57	14,68

Tabla 5-19 Abatimientos por efecto de la galería de pozos de abastecimiento

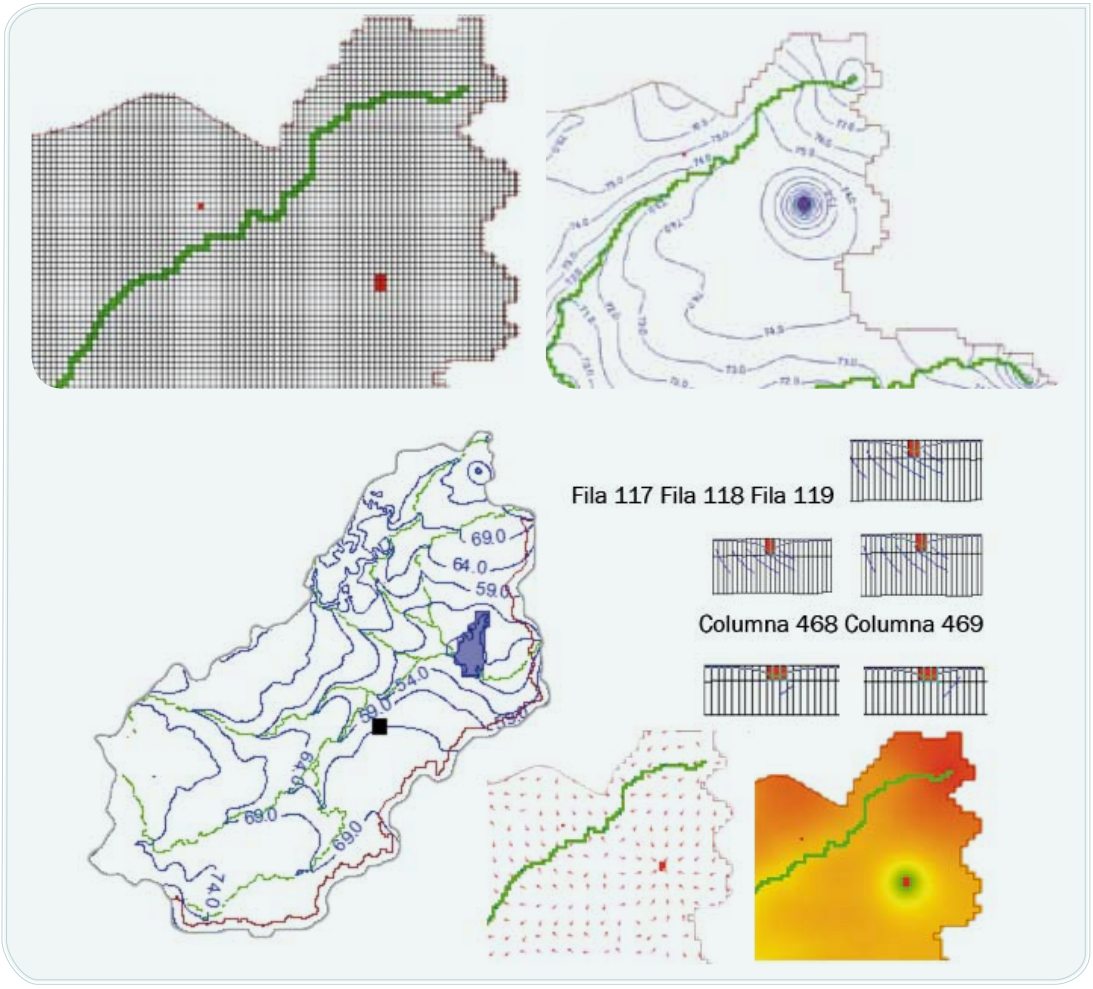


Figura 5-39 Resultados distribución de cabezas piezométricas por la galería de pozos

En el punto de monitoreo más cercano a la batería de pozos se aprecia que no se presenta ningún efecto en los niveles piezométricas (Figura 5-40).

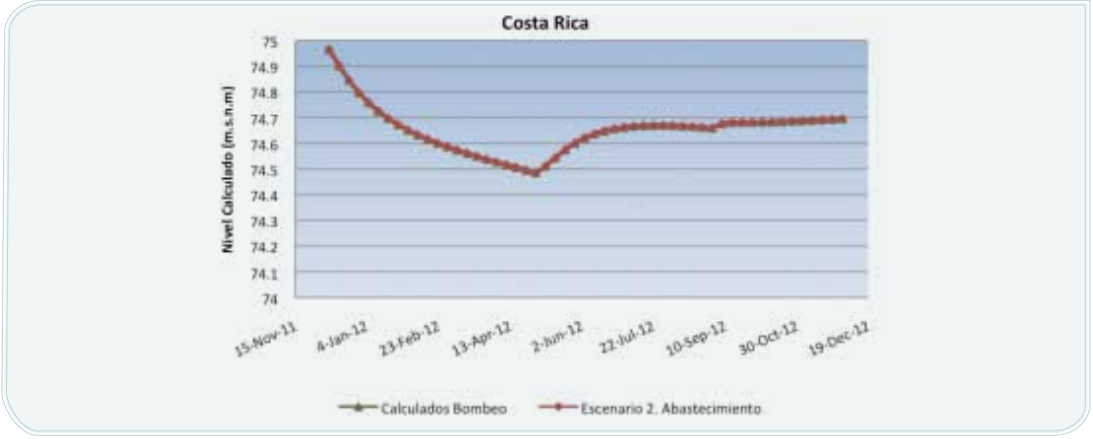


Figura 5-40 Resultados de abatimiento en un punto de observación cercano a la batería de pozos

5.8.4. Resultados Escenario 4. Proyecto Cambio Climático

Para simular los efectos en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, bajo un panorama de cambio climático, se aplicó al esquema de balance hidrológico una reducción del 6% en la precipitación promedio mensual y un aumento de 2ºC en la temperatura promedio mensual; para obtener los porcentajes de reducción de la recarga y el aumento en la evapotranspiración en cada periodo de estrés hidrológico. En la tabla 5-20, se muestras los valores asignados a cada zona.

Zona	Recarga (m/d)			ETR (m/d)
	SP1	SP2	SP3	
1	0,0006	0,0005	0,0007	0,0046
2	0,0003	0,0002	0,0004	0,0046
3	0,0016	0,0013	0,002	0,0047
4	0,0017	0,0014	0,0021	0,0047
5 - Afloramiento	0,0003	0,0002	0,0004	0,0046

Tabla 5-20 Variaciones por cambio climático en las propiedades de recarga entre periodos de simulación

En la figura 5-41, se observan algunos cambios en la configuración de la superficie piezométrica en especial en la zona suroccidental. Sin embargo, son más notables los efectos en el esquema de zonas de inundación, donde identifica una apreciable reducción de las mismas, en el límite noroccidental de la cuenca.

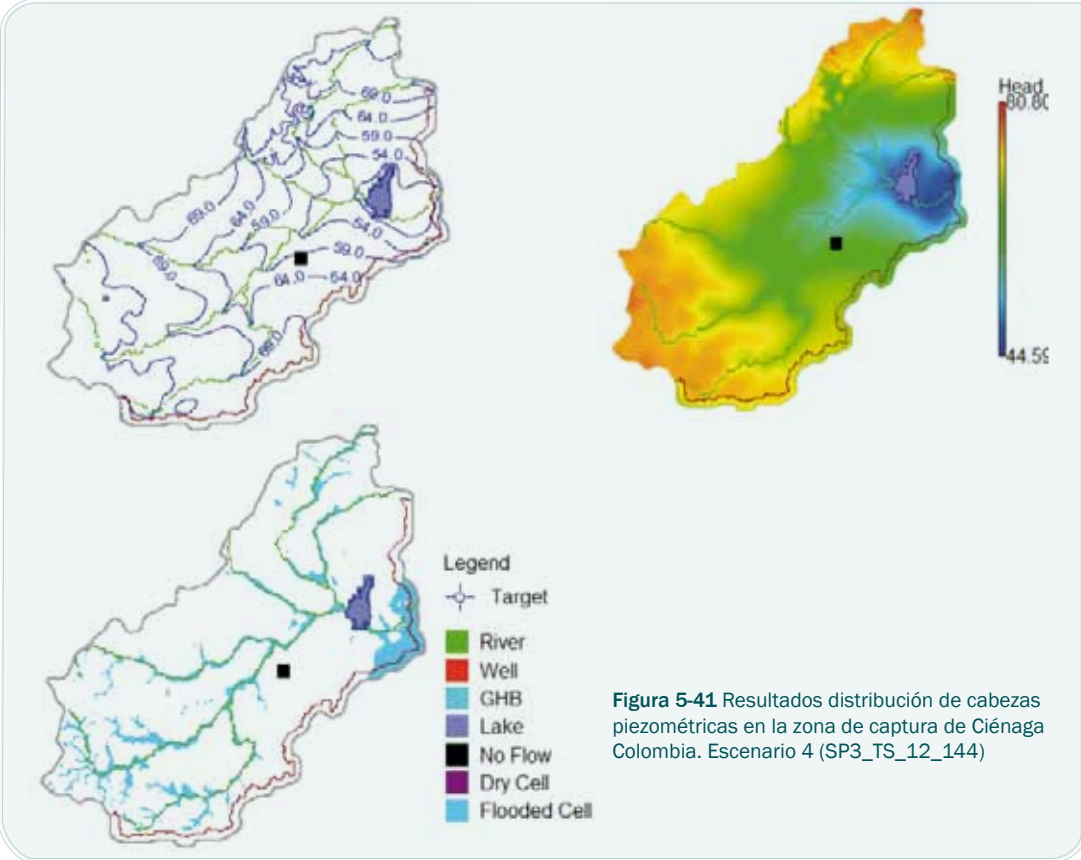


Figura 5-41 Resultados distribución de cabezas piezométricas en la zona de captura de Ciénaga Colombia. Escenario 4 (SP3_TS_12_144)

Con respecto a los efectos en el nivel de agua del humedal se identifica que bajo este panorama se presentan descensos de hasta 70 cm de agua que representan una pérdida máxima de aproximadamente 364.000 m^3 de agua (Tabla 5-21). En la tabla 5-22, se observa los efectos de la reducción general del nivel piezométrico en toda la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

SP	TS	T (días)	Nivel CC Demanda (m)	Nivel CC cambio climático (m)	Descenso Nivel (m)	Vol. extraído de agua en CC (m^3)
1	21	144,1	48,5555	48,4063	0,149	77.825
2	16	260,3	48,6787	48,2822	0,396	209.745
3	12	358	48,8455	48,1698	0,676	363.350

Tabla 5-23 Niveles de agua en el humedal por efecto del cambio climático en cada periodo de estrés hidrológico

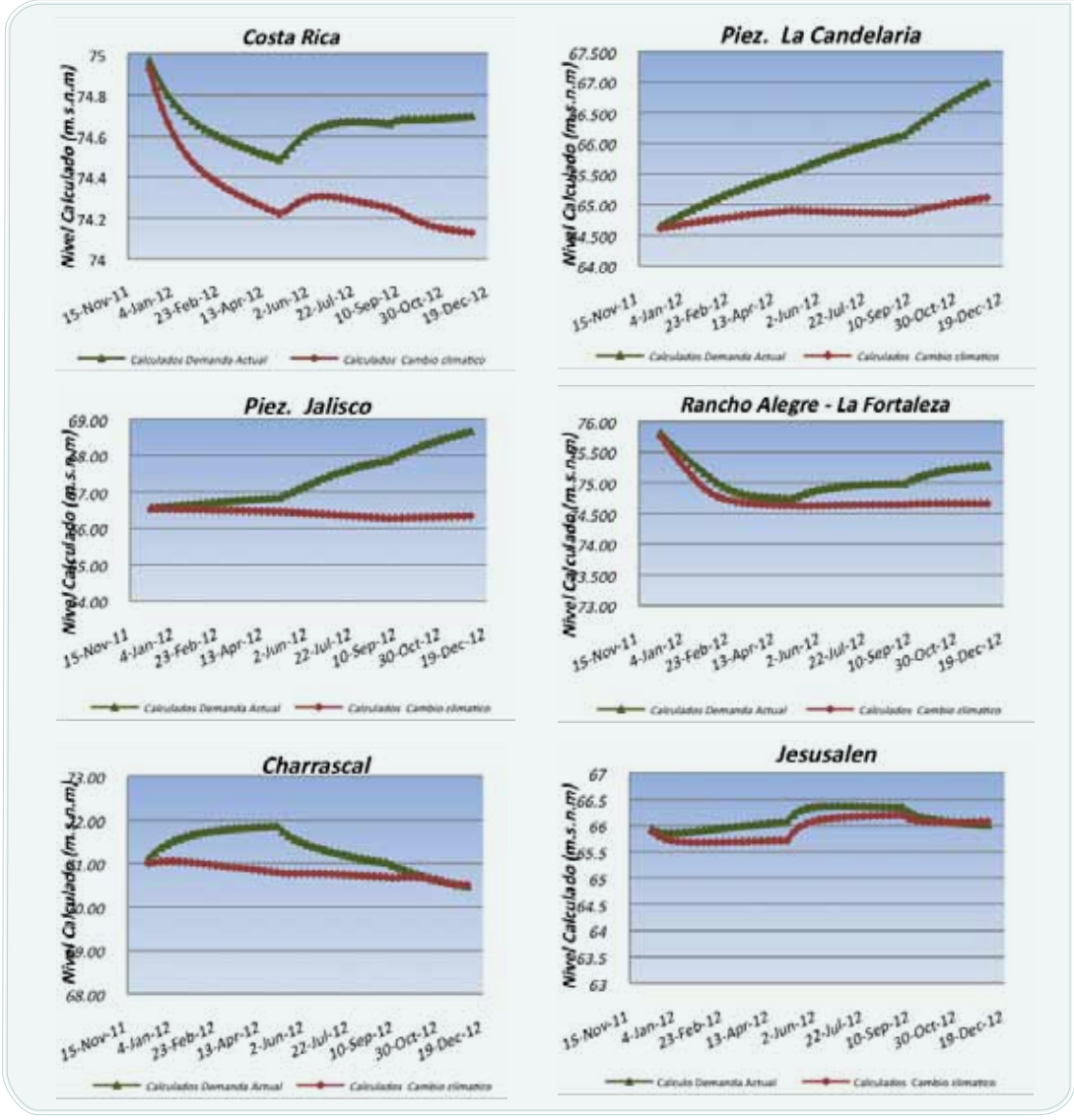


Tabla 5-22 Hidrogramas de comportamiento de cabezas calculadas y observadas en el estado transitorio por efecto del cambio climático

5.9. Modelo numérico preliminar del transporte de solutos en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia

De acuerdo a las condiciones actuales de contaminación para la zona de estudio y según los requerimientos de información documentados en el capítulo 2 para la modelación del transporte de solutos; se definió como modelo preliminar, el transporte advectivo de contaminantes empleando el modulo MODPATH versión 3.0 (Pollock, 1994). Este módulo permite describir la trayectoria de partículas y el tiempo de viaje de un contaminante conservativo en estado permanente y transitorio.

Adicionalmente, apoyados en las condiciones teóricas reportadas en la literatura, se buscó trascender a la modelación con el módulo MT3DMS, el cual además de tener en cuenta el transporte advectivo, permite la modelación de los fenómenos de dispersión y reacciones químicas. Este último proceso no es abordado en virtud de que no se cuenta con la información requerida y además, su complejidad ameritaba un trabajo más minucioso que no hace parte de los alcances de la nvestigación.

5.9.1 Trayectoria de partículas: modelación advectiva del trasporte de solutos

Para este análisis se propuso una serie de escenarios que permitieran evaluar la trayectoria de partículas y los tiempos de viaje de un contaminante conservativo bajo las condiciones de flujo subterráneo obtenidos en la modelación con MODFLOW en estado permanente y transitorio.

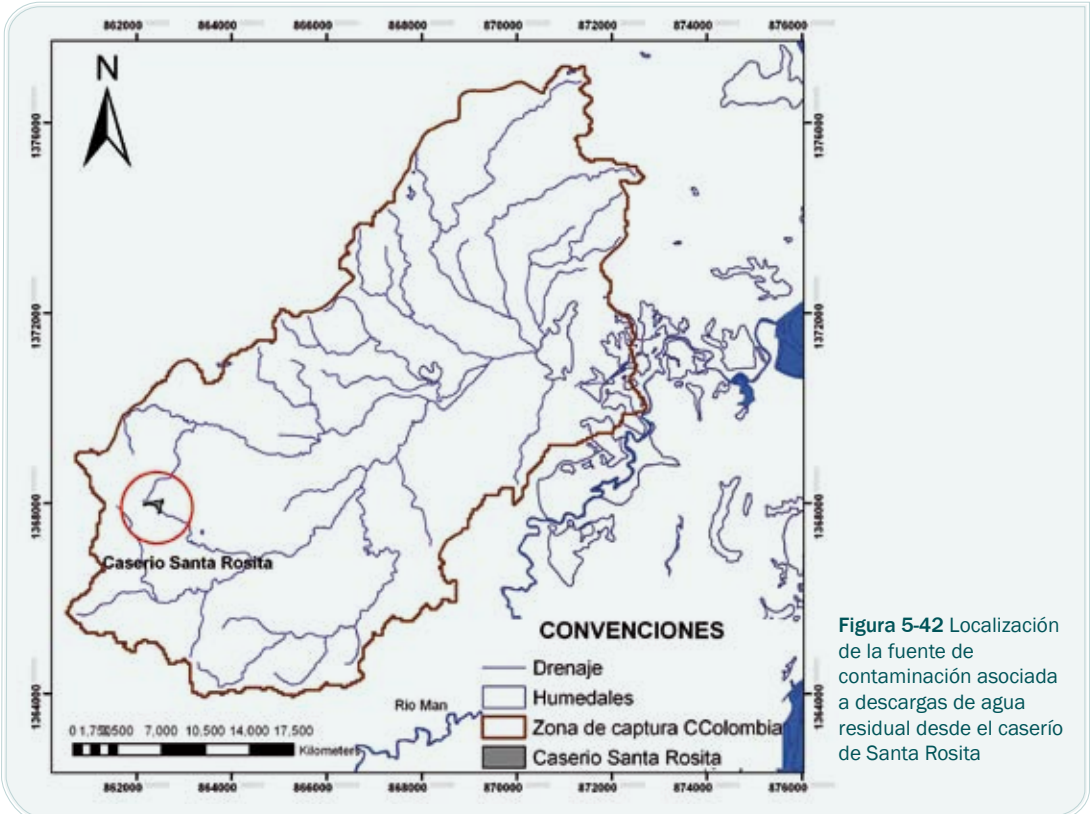


Figura 5-42 Localización de la fuente de contaminación asociada a descargas de agua residual desde el caserío de Santa Rosita

a. Descargas de agua residual desde los caseríos que se localizan en área de influencia de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

Para este propósito se definió como fuente de contaminación las descargas de agua residual generadas desde el corregimiento de Santa Rosita, evaluando cual sería la trayectoria que seguiría una partícula localizada al interior del polígono que representa el corregimiento –fila 445, columna 128– (Figura 5-42), y el tiempo que demoraría su depositación en alguno de los cuerpos hídricos aledaños.

En la Figura 5-43, se observan los resultados con temporalidad anual. Inicialmente, en los primeros metros la partícula transita la unidad hidrogeológica U_{123}, luego, se conecta con el acuitardo (U_4) desplazándose una distancia aproximada de 5.140 m, para finalmente reconectarse con el acuífero libre por ascenso desplazándose hasta llegar a una de las corrientes hídricas que alimenta el humedal –quebrada del Medio–.

La distancia total recorrida por la partícula en el sistema subterráneo fue de 5.840 m (294 celdas: 33 celdas en la capa 1 y 261 celdas en la capa 2), con un tiempo de viaje de 20.436 días. Este resultado sugiere que un contaminante infiltrado en el sistema subterráneo llegaría a afectar la corriente hídrica sólo hasta después de transcurridos aproximadamente 56 años desde su descarga. La celda final de la trayectoria está localizada en la fila 371 y la columna 346 correspondiente a una frontera tipo River. Las velocidades de flujo (Darcy o aparente) y reales del sistema subterráneo son en promedio de 0,23 m/d y 4,29 m/d, respectivamente.

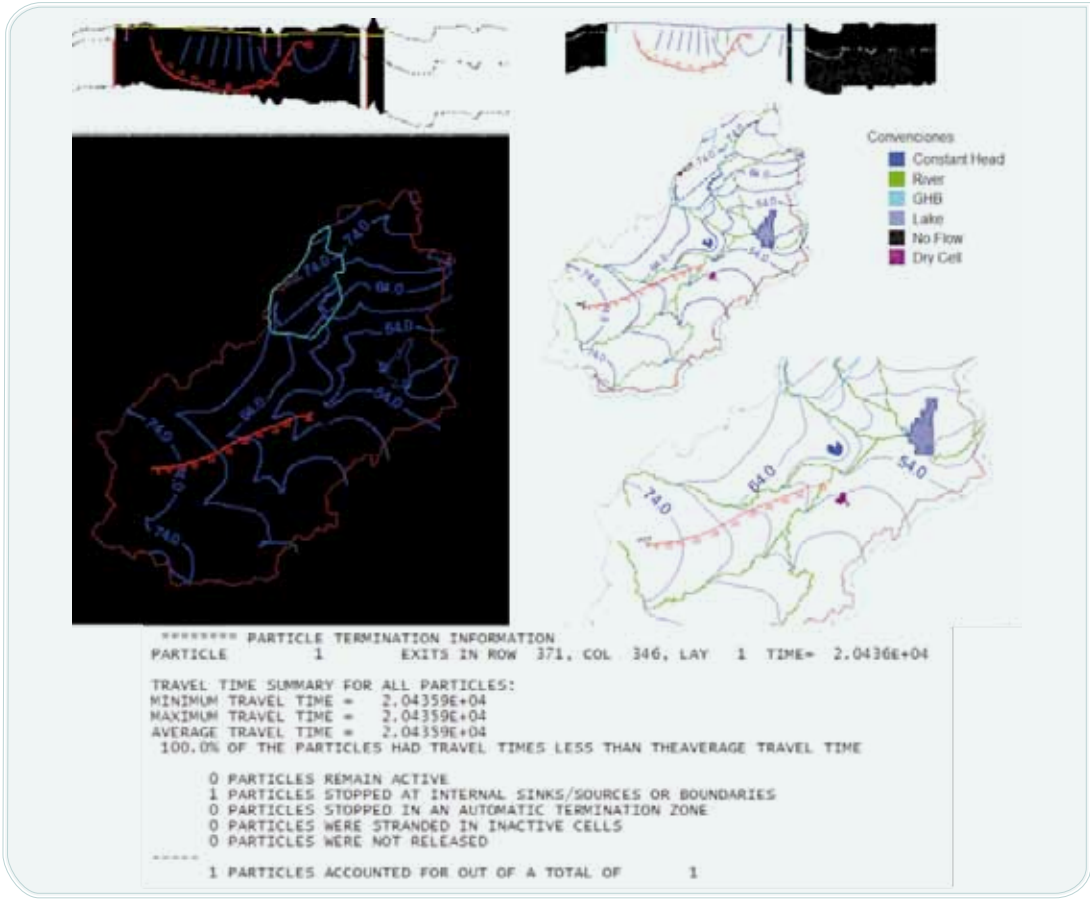


Figura 5-43 Resultados modelo advectivo trayectoria de partícula desde Santa Rosita- Estado permanente

La partícula en condiciones transitorias solo logra llegar hasta la segunda capa del modelo sobre la misma celda de entrada –fila 445, columna 128– (Figura 5-44). Este resultado era de esperarse teniendo en cuenta la longitud del periodo de simulación del modelo y la dinámica temporal del fenómeno estudiado. En los sistemas subterráneos se presentan bajas velocidades y tiempos de viaje del orden que decenas, cientos e incluso miles de años.

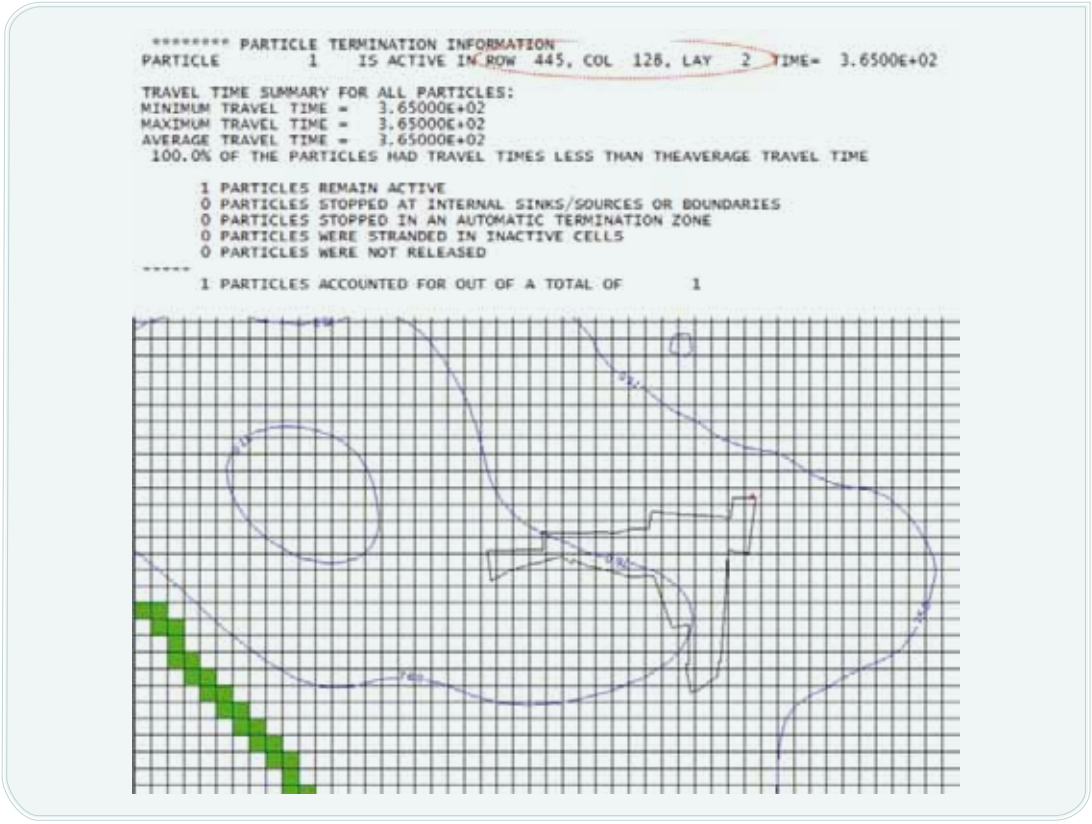


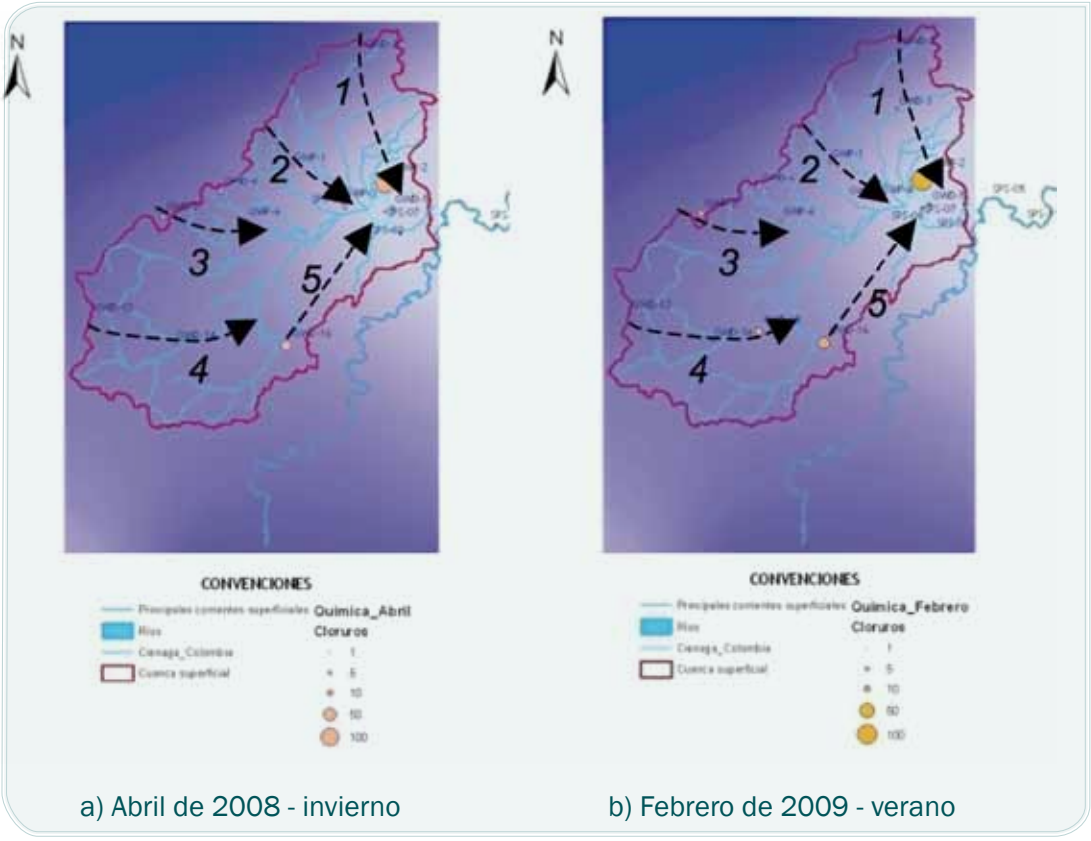
Figura 5-44 Resultados modelo advectivo trayectoria de partícula desde Santa Rosita–Estado transitorio

b. Verificación de algunas líneas de flujo subterráneo hacia el humedal Ciénaga Colombia

A partir del análisis de las superficies piezométricas promedio para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, se definieron cinco líneas de flujo (Tabla 5-23). A lo largo de cada una de estas líneas, tal y como fue documentado por Santa (2009), la concentración de cloruros en dos periodos hidrológicos (Figura 5-45) proporciona una primera prueba de identificación de las mismas en términos de su evolución química. En la línea 1, en general el agua está menos mineralizada hacía el norte y más mineralizada al sur de la trayecto de flujo, ya que iría incorporando nuevos solutos conforme fluye a través del medio sólido; en las línea de flujo 2 y 3 también se observa un leve incremento en estos dos parámetros (Santa, 2009).

Dirección de flujo	Código	Nombre
1	GWD-02	Costa Rica
	GWD-3	La Siberia
	GWP-02	P. Norte Ciénaga
2	GWP-01	P. La Candelaria
	GWP-03	P. Aduana-12
3	GWP-05	P. Santa Clara
	GWP-06	P. Jalisco
4	GWD-12	El Mirador Las Brisas
	GWD-14	Charrascal
	GWD-15	Jesusalén
5	GWD-16	El Topacio

Tabla 5-23 Puntos representativos en cada línea de flujo subterráneo



a) Abril de 2008 - invierno b) Febrero de 2009 - verano

Figura 5-45 Mapa de distribución de la concentración de cloruros. (a) invierno y (b) verano (Santa, 2009)

Los resultados obtenidos con la modelación de trayectoria de partículas permiten confirmar las direcciones de flujo 1, 2 y 5 propuestas para los sectores de Costa Rica – La Siberia – Piezómetro Norte Ciénaga; Piezómetros La Candelaria – Aduana 12m y El Topacio, respectivamente. Todas estas líneas de flujo muestran una clara interconexión del flujo subterráneo con el humedal. Los tiempos de viaje máximos alcanzan valores de hasta 40 años (Figura 5-46).

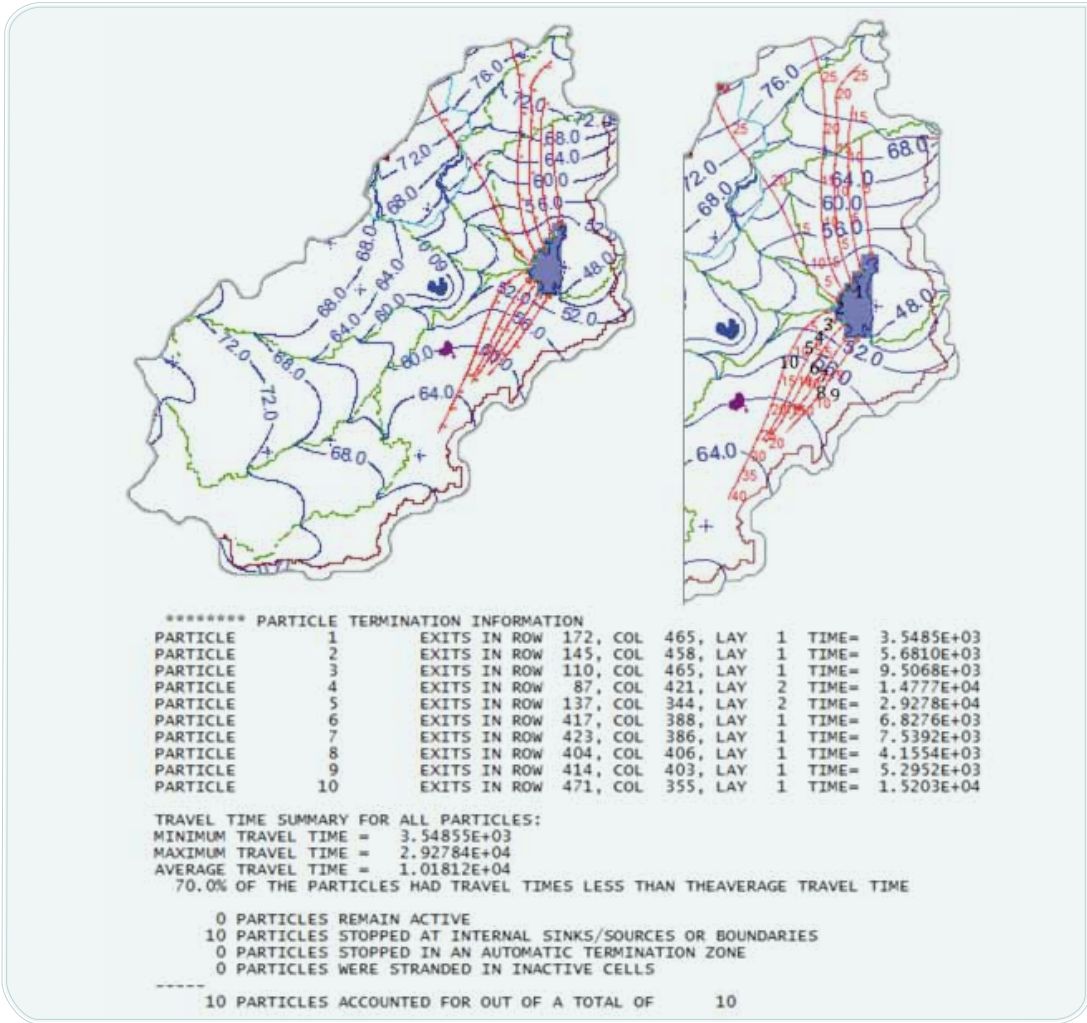


Figura 5-46 Resultados líneas de flujo hacia el humedal Ciénaga Colombia en estado permanente

Código Partícula	Desp. Total Acum (DX, DY, DZ)		Desp. Horizontal Acum (DX, DY)		Desp. Total Acum (DX, DY, DZ)		Desp. Horizontal Acum (DX, DY)	
	V flujo	V real	V flujo	V real	V flujo	V real	V flujo	V real
	m/d	m/d	m/d	m/d	cm/s	cm/s	cm/s	cm/s
1	0,64	11,42	0,64	11,39	0,0007	0,0132	0,0007	0,0132
2	0,53	9,71	0,53	9,67	0,0006	0,0112	0,0006	0,0112
3	0,46	8,19	0,46	8,17	0,0005	0,0095	0,0005	0,0095
4	0,41	8,28	0,41	8,25	0,0005	0,0096	0,0005	0,0095
5	0,34	6,79	0,34	6,75	0,0004	0,0079	0,0004	0,0078
6	0,36	6,38	0,36	6,35	0,0004	0,0074	0,0004	0,0074
7	0,35	6,23	0,35	6,22	0,0004	0,0072	0,0004	0,0072
8	0,46	7,57	0,45	7,44	0,0005	0,0088	0,0005	0,0086
9	0,44	7,37	0,42	6,96	0,0005	0,0085	0,0005	0,0081
10	0,3	5,66	0,3	5,62	0,0003	0,0065	0,0003	0,0065

Tabla 5-24 Velocidades promedio de flujo y reales por trayectoria de partícula

Las velocidades aparentes o de flujo y las velocidades reales obtenidas a partir del proceso de modelación (Tabla 5-24) corresponden de acuerdo con Castany (1963), a materiales que oscilan entre limos con diámetro de 0,06 mm y arenas finas con diámetro máximo de 0,2 mm. Según la configuración estratigráfica de la unidad U_{123}, estos valores, aunque aproximados, pueden asumirse como representativos para la unidad.

5.19.2. Transporte de solutos por advección – dispersión: lixiviación contaminantes conservativos

En la figura 5-47, se muestran los usos del suelo que predominan en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, a partir de los cuales se desprende la posibilidad de lixiviación de contaminantes de diferente origen (contaminación difusa).

Se propone el análisis del proceso de lixiviación de un contaminante conservativo como los cloruros, teniendo como base que las excretas humanas y en general las de todos los organismos superiores, (orina principalmente), posee una concentración de cloruros que es aproximadamente igual a la que se ingiere en los alimentos; si se supone que cada persona consume en promedio 2,5 gramos de ión cloruro, por día, (g/persona/día), y que cada persona ingiere aproximadamente 5 litros de agua por día, entonces la concentración de cloruros en la orina vendría a ser del orden de los 500 mg/L.

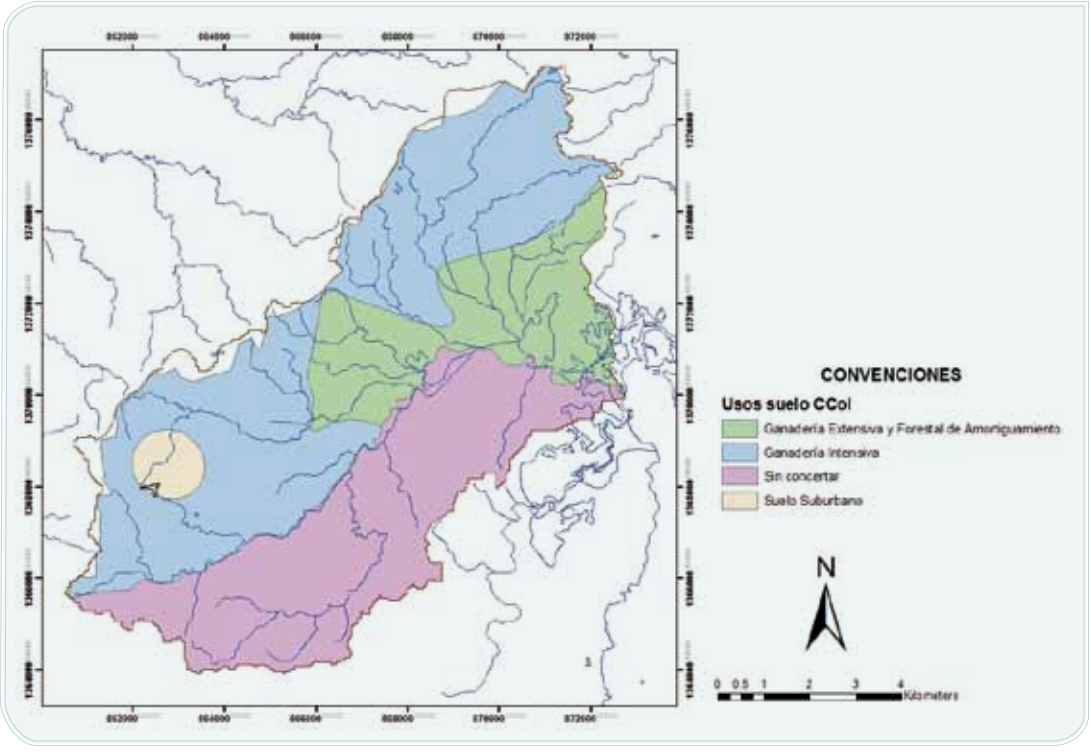


Figura 5-47 Usos del suelo en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia

La contaminación por cloruros producto del vertimiento de agua residual desde el corregimiento de Santa Rosita (suelo suburbano) fue modelado como una descarga de 5 Kg/m^3 de Cl^- por celda, suponiendo una densidad poblacional de 10 habitantes.

La población total actual del corregimiento es de aproximadamente 760 personas localizadas en un área de 47.500 m^2 (76 celdas en el modelo numérico). Los resultados se muestran en la figura 5-48.

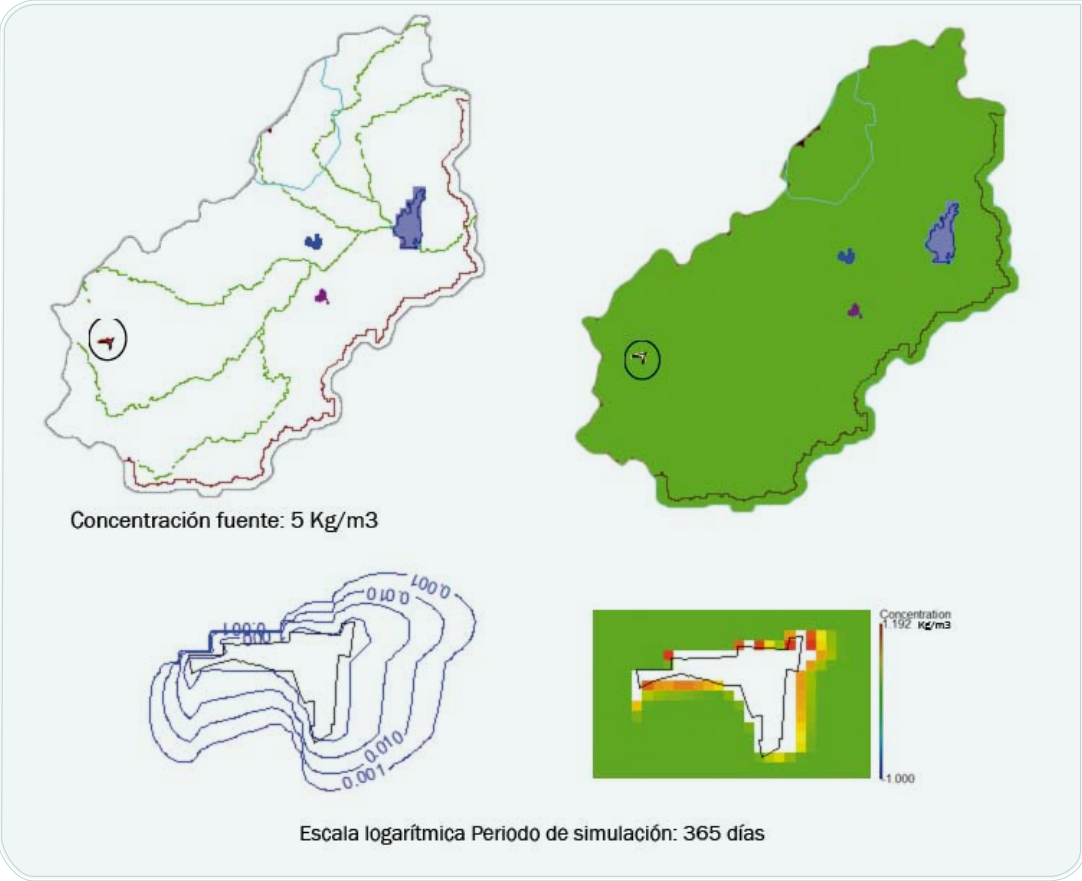


Figura 5-48 Distribución por lixiviación de la concentración de cloruros en el corregimiento de Santa Rosita

El segundo escenario hace referencia a la lixiviación de mercurio por la minería aluvial que se identifica en la zona, en la que de acuerdo con la literatura se pueden presentar pérdidas de hasta 25 Kg de mercurio para recuperar 1 Kg de oro; cuando el mercurio se añade directamente a la grava aurífera in situ, antes del bombeo, o en un barril mezclador. Se adopta una concentración por celda de 78 Kg/m^3 asumiendo que por celda existe 3.125 Kg de suelo explotable y que en promedio se obtienen 5 Kg de oro por cada metro cúbico de suelo molido. Los resultados del proceso de lixiviación del mercurio se muestran en la figura 5-49.

La lixiviación de contaminantes conservativos en la zona de captura de Ciénaga Colombia, exhibe dinámicas de difusión que siguen las trayectorias del flujo subterráneo, en la que las plumas de contaminación llegan a alcanzar, aunque con valores mínimos, las corrientes superficiales que alimentan el humedal. Caracterizaciones recientes de la concentración de mercurio en la Ciénaga, han arrojado resultados que no superan los límites permisibles de 1 µg/L establecidos en la normatividad ambiental vigente (Corantioquia, 2008).

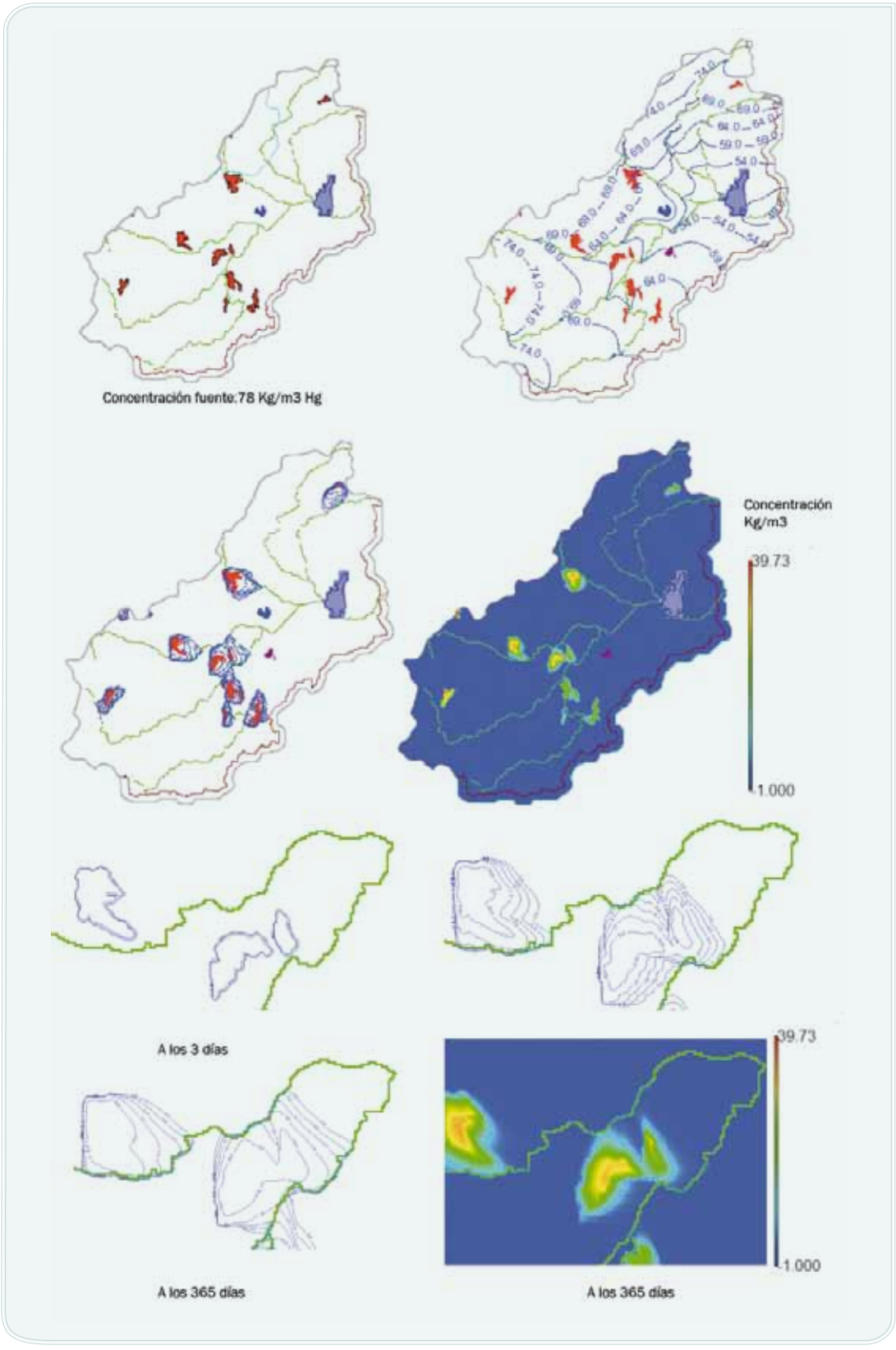


Figura 5-49 Distribución por lixiviación de la concentración de mercurio por la práctica de la minería aluvial

6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

LLueve en silencio, que esta lluvia es muda...

LLueve en silencio, que esta lluvia es muda
y no hace ruido sino con sosiego.
El cielo duerme. Cuando el alma es viuda
de algo que ignora, el sentimiento es ciego.
Llueve. De mí (de este que soy) reniego...

Tan dulce es esta lluvia escuchar
(no parece de nubes) parece
que no es lluvia, más solo un susurrar
que así mismo se olvida cuando crece.
LLueve. Nada apatece...

No pasa el viento, cielo no hay que sienta.
Llueve lejana e indistintamente,
como una cosa cierta que nos mienta,
como un deseo grande que nos miente.
Llueve. Nada en mí siente...

Fernando Pessoa, versión Ángel Crespo

6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

6.1. Discusión y conclusiones

Con una extensión de aproximadamente 3.500 Km^2, se identifica en el Bajo Cauca antioqueño un sistema hidrogeológico, conformado por un acuífero libre, unidad U_{123}, un acuitardo o capa confinante, U_4, y un acuífero confinado, U_5. La unidad hidrogeológica, U_{123}, interactúa hidrodinámicamente con las corrientes superficiales, rio Cauca, Man y Cacerí, y con el complejo de humedales que se localizan en la cuenca baja del río Man.

El humedal Ciénaga Colombia, según estudios recientes y de acuerdo con observaciones de campo y con los resultados de este proyecto, presenta una dinámica hidrológica de alta complejidad, fuertemente influenciada por los regímenes hidrológicos locales y por la dinámica regional de la escorrentía a lo largo del río Cauca.

La metodología definida en el marco de este proyecto de investigación resulta adecuada para el desarrollo de los modelos conceptual y numérico orientados a representar las interrelaciones entre las aguas superficiales y subterráneas del sistema hidrológico Ciénaga Colombia en el Bajo Cauca antioqueño.

La construcción de un modelo hidrológico conceptual, independientemente de la escala de análisis, necesita del conocimiento e interpretación de las características fisiográficas de la zona de estudio, la geometría de red de drenaje, las características morfométricas de la cuenca, las zonas de recarga y descarga, y las posibles conexiones entre sistemas hídricos identificados.

Contar con un Modelo Digital de Elevación –MDE– de resolución adecuada es indispensable para disponer de una representación espacial de la superficie freática del acuífero, geometría, red de flujo y distribución de las propiedades hidráulicas con las cuales se pretende alimentar el modelo numérico. Mediante el uso de las posibilidades que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica –SIG– y con aplicación de criterios geomorfológicos y técnicas geoestadísticas se logró refinar la cartografía básica disponible hasta obtener el MDE adecuado para los fines del proyecto.

El modelo numérico de flujo desarrollado permitió identificar las trayectorias de agua subterránea y la interconexión del acuífero libre con el humedal y con las principales corrientes superficiales. El agua fluye desde las divisorias norte y oeste de la

cuenca hacia el humedal; y desde el suroeste y sur de la ciénaga se aprecia la migración espacial de una divisoria de agua subterránea que no coincide con la divisoria superficial y que permitiría el ingreso o salida del agua desde la zona de captura.

El modelo exploratorio sirvió para ajustar el modelo hidrológico conceptual en el sentido de la importancia de inclusión de las corrientes superficiales identificadas en los límites norte y noroeste de la zona de captura de humedal Ciénaga Colombia.

La superficie piezométrica calculada para el acuífero libre presentó una distribución espacial similar a las reproducidas para la condición promedio de cada periodo de estrés hidrológico. Dichas superficies fueron construidas usando técnicas de interpolación geoestadística para 33 puntos de monitoreo de la variación del nivel estático.

Las variaciones de nivel piezométrico no superan los 3 metros entre invierno y verano. El nivel freático se localiza cerca de la superficie, llegando a manifestarse en el terreno como pequeños afloramientos o humedales que no superan 1 m de profundidad, especialmente en los sectores norte, noroeste, oeste y suroeste de la zona de captura, esta condición también fue reproducida por el modelo numérico y corroborada con trabajo de campo.

Con respecto a las condiciones de flujo subterráneo en la zona de captura para el periodo de simulación comprendido entre diciembre 2007 – noviembre 2008, fue posible identificar tres momentos durante los cuales la posición de la superficie freática del acuífero libre registró claras variaciones: i) Periodo entre diciembre 2007 y abril 2008, en el cual se observó un descenso continuo en los niveles freáticos (mayores profundidades); ii) Periodo entre mayo y agosto de 2008, donde se presentó una recuperación del nivel freático, alcanzando sus más altos niveles; y iii) un periodo entre septiembre y noviembre de 2008, donde se registraron condiciones aproximadamente estables con tendencia al ascenso.

Se logró estimar la recarga a partir del método de oscilación del nivel freático –WTF–, esta variable fue empleada en el proceso de calibración del modelo numérico. Igualmente, el ejercicio de verificación de un segundo conjunto de datos de campo representativos del año 2009, permitió categorizar el modelo construido como un aceptable para emprender ejercicios de simulación.

El modelo numérico permitió simular la dinámica actual de explotación de agua subterránea. Los resultados muestran que las tasas de bombeo actual no afectan el acuífero respecto a la distribución y magnitud de los niveles piezométricos.

Un aumento de la demanda actual en dos órdenes de magnitud, produce efectos sobre el humedal provocando descensos centimétricos y superficies de abatimiento asociadas a los pozos localizados al sur y suroccidente de la cuenca.

Se logró evaluar la influencia de un pozo de bombeo para satisfacer la demanda de agua de futuros desarrollos turísticos, alcanzando cambios mínimos en el nivel de agua del humedal, con lo cual se concluye que la propuesta de localización es adecuada y que podrá implementarse sin poner en riesgo la integridad ecosistémica de la Ciénaga Colombia.

Un resultado que trasciende los objetivos de este trabajo pero que tiene gran importancia para la Gestión Sostenible del sistema hidrológico analizado, se relaciona con la reducción en los niveles de agua del acuífero y del humedal por efecto del

cambio climático, escenario que evidenció lo vulnerable que puede llegar a ser el sistema hidrológico por efecto de una ligera reducción en la magnitud de las precipitaciones, por el aumento en la evapotranspiración, o por una combinación de las dos variables. Una reducción del 6% en la precipitación produce descensos anuales de hasta 70 cm. de agua en el nivel del humedal, lo que representa una pérdida de agua cercana a los 364.000 m^3 y descensos de 2 metros de profundidad en los niveles piezométricos del acuífero libre.

El trabajo desarrollado para lograr una aproximación al fenómeno de transporte de solutos en la zona de captura del humedal mediante el uso del modulo MODPATH, permitió validar las líneas de flujo subterráneo que directamente llegan al humedal desde los limites norte, noroeste y sur de la zona de captura; el tiempo de viaje de posibles contaminantes hasta llegar a las corrientes superficiales y evaluar la influencia de los pozos que actualmente operan en la zona.

Los análisis de lixiviación de contaminantes conservativos con el modulo MT3DMS, permitieron identificar de acuerdo con los usos existentes en la zona, las dinámicas de difusión de contaminantes asociados a cada actividad; los cuales siguen las líneas de flujo subterráneo. Para el caso de lixiviación desde la superficie se emplearon dos trazadores, los cloruros provenientes de las aguas residuales domésticas y el mercurio liberado en los procesos de amalgamación del oro. Hace falta profundizar en este tema y caracterizar para la zona de estudio los coeficientes de dispersividad y demás parámetros que apliquen a cada caso.

A partir del conocimiento que se tiene del acuitardo –U_4–, que corresponde a la capa base de la unidad hidrogeológica U_{123}, se obtuvieron resultados consistentes para múltiples escenarios que siempre evidenciaron la conexión vertical y lateral entre ambas unidades.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten reforzar la idea de que la modelación numérica –exploratoria y de simulación– es útil en la medida en que proporciona una estructura para sistematizar la información de campo, para responder preguntas sobre el funcionamiento del acuífero; para llamar la atención del modelador en relación con la ocurrencia de fenómenos que no hayan sido considerados, pueden ayudar a identificar áreas donde se requiere información adicional, así como la necesidad de ajustar el modelo conceptual inicialmente concebido.

El modelo numérico de flujo obtenido para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia, se constituye en una herramienta de apoyo para continuar con los proyectos de exploración y evaluación en la zona de influencia del humedal. Los resultados de verificación para el estado permanente y de calibración para cada uno de los periodos hidrológicos en condición transitoria, soportan su uso con fines predictivos.

6.2 Recomendaciones

Hay muchos retos por afrontar y limitaciones por vencer: la cantidad y calidad de la información a partir de la cual se obtienen los modelos conceptuales o con la que se busca la validación nunca es suficiente; así la confianza en la calibración y los márgenes de incertidumbre siempre estarán presentes. A futuro la modelación numérica tendrá que enfrentar grandes desafíos: la incertidumbre y la sorpresa asociados a la conceptualización del modelo, la calibración automática, la incertidumbre en la simulación y el problema inverso (Custodio et al., 2000; Bredehoeft, 2005; Carrera et al., 2005 y Betancur y Palacio, 2009). La modelación iterativa en la que continuamente se monitorea y revisa el modelo ajustando nuevos datos, proporciona la mejor oportunidad para evitar errores incluyendo los conceptuales.

Dado que los resultados de balance de agua para el sistema acuífero y la distribución espacial de las superficies piezométricas en la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia muestran una evidente conexión no solo del humedal con el sistema acuífero, sino también de las corrientes superficiales con el mismo; se recomienda redefinir para futuras modelaciones las fronteras tipo River por fronteras tipo Stream en toda la zona de captura. Debe tenerse en cuenta que la utilización del paquete Stream Routing Package exige el conocimiento de los caudales en cada uno de los tributarios involucrados; información que no estaba disponible con el detalle requerido durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Es necesario realizar nuevos ajustes o verificaciones una vez se cuente con la información de pruebas de bombeo para las unidades U_{123} y U_4 en la zona de captura y cuando se disponga de la nueva información proveniente de la red de monitoreo. De este modo, se podrá mejorar la calibración para el periodo seco que presenta el menor coeficiente de correlación y los mayores errores residuales.

Explorar los paquetes disponibles en el medio siempre favorecerá el acercase aun mas al conocimiento del comportamiento de este tipo de ecosistemas, teniendo en cuenta que la dinámica de los sistemas lénticos, y en especial la de los humedales, presenta complejos sistemas de flujo horizontal y vertical, debido a las características de la vegetación localizada en el fondo de sus lechos y a las condiciones orgánicas de sus sedimentos. El paquete Wetland Package (Restrepo et al., 1998) del SFWMD - FAU (South Florida Water Management Distrit y Florida Atlanctic University), se constituye en una excelente opción de exploración. La falta de documentación para su uso y las inconsistencias actuales en las adaptaciones comerciales disponibles, imposibilitando su utilización en el marco de esta investigación.

En un futuro cercano sería conveniente refinar la malla del modelo actual, adicionando capas que permitan incluir la totalidad de los compartimentos hidrológicos.

La dinámica de flujo que el río Cauca le imprime al sistema de humedales de la cuenca baja del río Man deberá ser estudiada para las épocas en que se comporta como una corriente perdedora.

Es importante identificar y caracterizar con detalle los afloramientos de pequeños humedales en la parte alta de la zona de captura, los cuales se evidenciaron continuamente en las corridas en estado permanente y transitorio. Su validación o ajuste en el modelo numérico actual, requiere del conocimiento de su localización geográfica y del monitoreo constante de la variación de nivel de agua durante los escenarios de invierno y verano.

Se recomienda realizar perforaciones exploratorias, pruebas de bombeo, sondeos eléctricos verticales, aforo de los caudales de entrada y salida del humedal; que permitan identificar con mayor detalle las heterogeneidades del medio subterráneo y continuar con la operación de la red de monitoreo para la determinación de la variación piezométrica en el acuífero libre, incluyendo puntos de observación en la zona noroccidental de la cuenca, donde se tiene conocimiento del afloramiento de la unidad hidrogeológica U_4 y en la zona sur, donde se insinúa la divisoria subterránea.

Se debe continuar con la exploración y estudio de la dinámica del transporte de contaminantes en la zona de captura. Aunque en la actualidad no se identifican procesos productivos o el asentamiento de industrias que generen cargas contaminantes altas o peligrosas, se tiene conocimiento de la práctica de algunas actividades que pueden estar afectando el sistema subterráneo, especialmente con respecto a contaminación directa por patógenos debido a deficiente saneamiento básico, así como la contaminación difusa producida por la ganadería extensiva y la explotación minera de tipo aluvial.

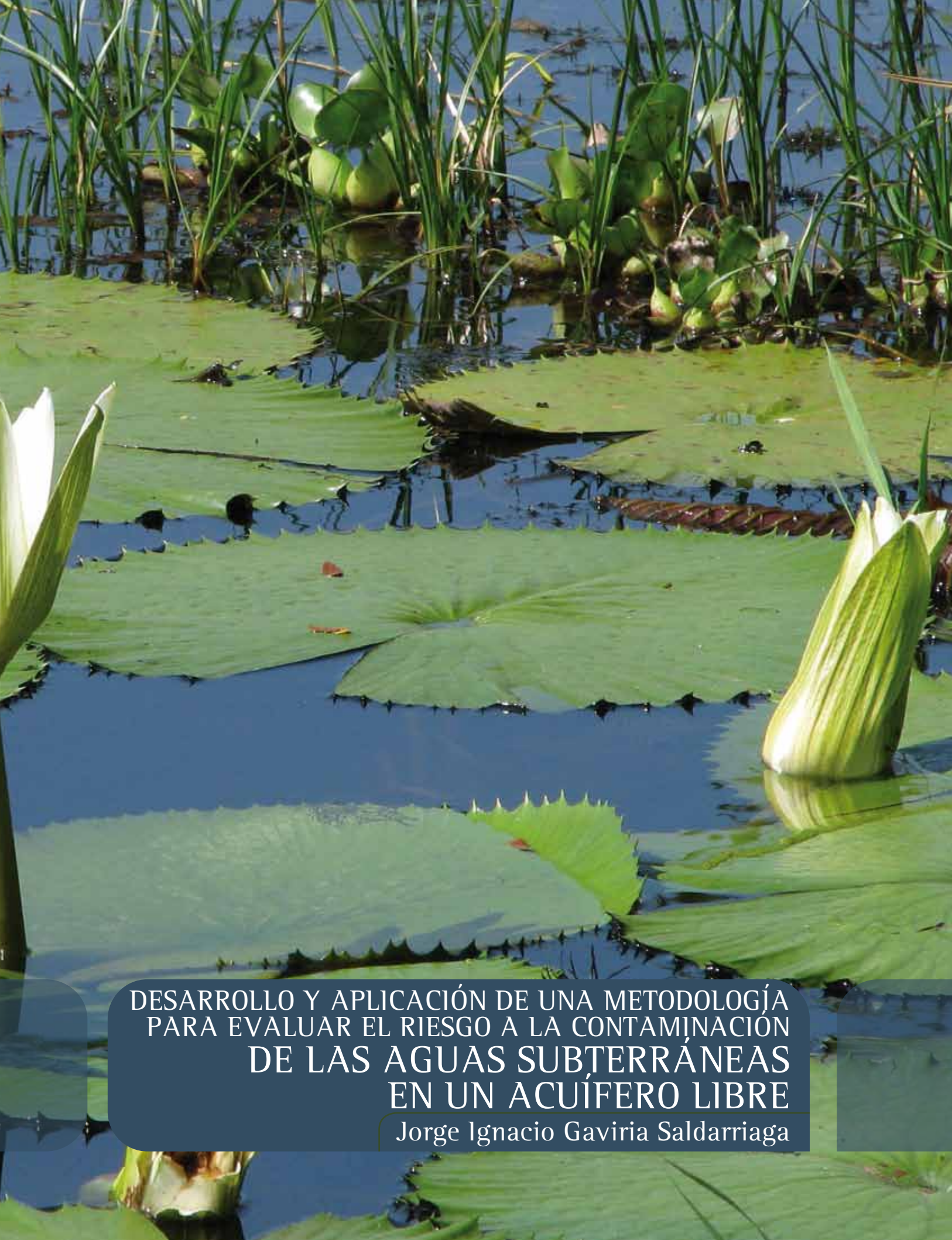
Se recomienda construir un modelo de transporte de solutos de incluya no solo el fenómeno de advección, sino también la difusión y las reacciones químicas, para lo cual deberá considerarse el levantamiento de información específica para su aplicación.

Culminar la tarea de construir un modelo de transporte para un contaminante conservativo como los cloruros es importante, mas cuando se cuenta con un modelo aceptable de flujo y con la información de ocho campañas de monitoreo en las que se determinó la concentración de cloruros para en los compartimentos superficial y subterráneo.

Es recomendable explorar la versión mejorada del MT3D conocida como MT3DMS con el objetivo de conocer al detalle su funcionamiento y los requerimientos de información. Así como algunos modelos de transporte específicos para el paquete Lake como el MOC3D.

Para evaluar fenómenos que tengan incidencia en el sistema en un periodo de simulación de largo plazo, el fenómeno de trasporte de solutos, sería importante el uso de modelos acoplados, partiendo del estado permanente y ajustándolo a condiciones transitorias de interés.

A partir del análisis de los registros de temperatura media mensual del periodo 1969 – 2006 para la estación Cacaoteras del Dique (código 2625504), se observa un incremento en el gradiente de temperatura. A pesar de que este componente no hizo parte de los objetivos de esta investigación, pero dada la importancia de esta variable en el escenario actual de cambio climático, se recomienda abordar este comportamiento climático en un proyecto posterior.



DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RIESGO A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UN ACUÍFERO LIBRE

Jorge Ignacio Gaviria Saldarriaga

A mis Padres por su inmenso amor.

Directora: Teresita Betancur V.
Asesora: María Rueda
Asesoría Gestión del riesgo: Françoise Coupe
Hector Massone

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por la vida y la fortuna de tener seres llenos de amor alrededor.

Gracias a mis padres: José Obdulio Gaviria Uribe y María Arabia Saldarriaga Jiménez por tantas cosas, si lo escribiera, sería más largo que la presente publicación del trabajo de investigación. En esta ocasión les agradezco su amor, compañía, compromiso y esas ganas de querer siempre lo mejor para mí.

Gracias a la familia por estar pendientes de mi bienestar y por brindarme su apoyo incondicional en todo momento.

A ti corazón por amarme y dejarte amar, eso es mucho decir.

A Teresita Betancur, por su gran amor y por su compromiso en todo lo que hace.

A los amigos y compañeros de jornadas de estudio, diversión y en algunas ocasiones de poco entendimiento, pero que sirven para iluminar el camino.

A los profesores y demás personas que estuvieron en ese camino; Paola Palacio, María Rueda, John Fernando Escobar, Jackeline Correa, Carolina Martínez, Diana Montoya, Diana Santa, Angélica Gómez, Liliana Otalvaro, Hector Massone, Jesús Vías, Fabio Peluso, Daniela Ducci, Francoise Coupe, Alicia Betancur, Jorge Arboleda, Daniel Martínez, Mauricio Quiroz, Yadira Cely, José Rueda, Hugo Llorente, Carlos Meza, Rubén Molina, Hernán Orrego, Guillermo Gutiérrez, Andrés Ramírez, Juan Bedoya, Clara y Alba Martínez.

A la Universidad de Antioquia, al grupo GIGA y al grupo GAIA.

A Corantioquia, al grupo de trabajo y especialmente a Diana Montoya, Jorge Ángel, Oscar Mejía, Catalina Posada, Claudia Castaño y Luz Marina Betancur.

A las administraciones municipales de Caucasia y Cáceres, principalmente en la oficinas del SISBEN; Yandila Florez, Ruby Sánchez y Carmen Rivera en Educación.

Al Programa de Cooperación Científico-Tecnológico entre el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina (MINCYT) y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS), que involucra la Universidad de Antioquia - Colombia y la Universidad Nacional del Mar del Plata – Argentina.

A los habitantes de Santa Rosita, Campo Alegre, El Man, El Jardín, Guarumo, Manizales, San José del Man, Río Man, Las Pampas, Santa Lucia y Nicaragua por hacer parte del proyecto y las ganas de aportar.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

Con la finalidad de contribuir con una herramienta para la adecuada planificación y protección de los recursos naturales, en éste caso del recurso hídrico subterráneo, el cual hace parte fundamental de la organización de una comunidad y por lo tanto de su territorio, se ha planteado una metodología para evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas en un acuífero libre, caso de estudio: cuenca baja del río Man, Bajo Cauca antioqueño en Colombia.

El marco metodológico comienza con el planteamiento del modelo hidrogeológico conceptual, es decir, la identificación y descripción de los componentes y procesos presentes en el sistema. La información consignada en el modelo hidrogeológico permite evaluar mediante la metodología DRASTIC la vulnerabilidad intrínseca, y el conocimiento de las condiciones de calidad del agua subterránea posibilita la validación de dicho método. El conocimiento de los usos del suelo y de las principales actividades económicas que desarrolla la población proporcionan los elementos para evaluar la posible carga contaminante que puede afectar la calidad del agua almacenada en el subsuelo. De la relación entre vulnerabilidad intrínseca y carga contaminante se obtiene el peligro a la contaminación de las aguas subterráneas.

Ya alcanzada la evaluación al grado del peligro a la contaminación, es prioritario trascender a la determinación del riesgo, para lo cual se requiere un análisis de la susceptibilidad de la población que será adversamente afectada por un evento de contaminación de las aguas subterráneas. El impacto potencial de un evento de contaminación de las aguas subterráneas sobre la población depende de la vulnerabilidad de la misma, la cual hace referencia a las características que le impiden o dificultan afrontar y adaptarse a un cambio en el ambiente. Por lo anterior, se incorpora en la metodología la determinación de la vulnerabilidad humana, a partir de una serie de elementos relevantes que se sintetizan en las variables: exposición, fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia de la población.

Finalmente, la interacción entre los componentes, vulnerabilidad humana y peligro a la contaminación definida mediante una función matemática, permite obtener el riesgo asociado a la contaminación de las aguas subterráneas, el cual puede representarse mediante mapas con la utilización de los Sistemas de Información Geográfica.

Para la zona de estudio se obtuvieron cinco mapas de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, asociado a las actividades de desarrollo urbano,

producción agrícola, producción pecuaria, extracción minera y accidentes ambientales. Igualmente se presentan tres propuestas de mapas de riesgo total a la contaminación de las aguas subterráneas en condición crítica, promedio y prevalente. Con relación al riesgo crítico, se obtuvieron dos clases de riesgo a la contaminación para el 99% del área de estudio: extremo y alto. El primero se presenta en el 11% de la zona de estudio, en la totalidad de El Jardín. La categoría de riesgo alto se presenta en el 88 % del territorio, en la totalidad de las veredas Nicaragua, Las Pampas, San José del Man, Guarumo, Santa Rosita, Campo Alegre, Río Man y El Man y en gran parte del territorio de Manizales y Santa Lucia. En estas dos últimas también se presenta riesgo moderado, lo cual representa el 1% de la zona de estudio.

PALABRAS CLAVES: Riesgo, peligro, vulnerabilidad humana, carga contaminante y vulnerabilidad intrínseca.

INTRODUCCIÓN

Amor: recuerda que al verdadero guerrero
se le conoce no cuando gana la batalla,
sino cuando se siente vencido y se levanta
de nuevo victorioso...
Confía siempre en ti mismo y en Dios,
que tú y yo sabemos que puedes.

Sandra Posada

INTRODUCCIÓN

Es necesario reconocer el agua como un recurso finito, es decir limitado, consideración que ayudará para que se gestionen sus usos y su calidad de manera tal que el agua siga cumpliendo con su función vital para el ser humano y los ecosistemas.

A escala mundial las aguas subterráneas están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por diferentes actividades. De acuerdo con lo anterior es de vital importancia establecer prioridades para identificar y clasificar aquellas actividades potencialmente contaminantes y su interacción con la vulnerabilidad intrínseca del medio acuífero, de manera tal que permita determinar el peligro a la contaminación de las aguas subterráneas. Lo anterior debe ser complementado y articulado con la determinación de la vulnerabilidad humana, para lograr una aproximación a la evaluación de los impactos que puede sufrir la población y el ecosistema, que se benefician de este recurso hídrico.

Teniendo en cuenta que la zona rural en la cual se asienta la población perteneciente a la cuenca del río Man, depende en gran medida de las aguas subterráneas, porque son una fuente de agua natural segura para el abastecimiento doméstico, ya que las fuentes superficiales existentes en la zona presentan limitaciones relacionadas con la calidad, la cantidad y el acceso, y porque mantienen el caudal base y los niveles en ríos y ciénagas en épocas de estiaje, se deben emprender trabajos de investigación para dar pautas y herramientas en la gestión del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

El impacto de un evento de contaminación de las aguas subterráneas sobre la población depende de la vulnerabilidad de la misma, la cual hace referencia a las características que le impiden o dificultan afrontar y adaptarse a un cambio del ambiente.

La determinación del riesgo, además de tener en cuenta los aspectos técnicos de una evaluación hidrogeológica, se relaciona directamente con los componentes físicos, sociales, económicos, educativos, políticos, culturales e institucionales de cada población, por lo tanto, lo ideal para abordar este tipo de estudio sería conformar un grupo de trabajo multidisciplinario con adecuado conocimiento de los áreas mencionadas, lo cual llevaría a plantear las medidas de gestión más adecuadas donde se conjuguen: la protección de las aguas subterráneas, el mejoramiento de la calidad de agua suministrada y de alguna manera aportar en el mejoramiento de la calidad de vida de la población.

Debido a lo anterior se propone como objetivo para este trabajo de investigación: *desarrollar y aplicar en la cuenca baja del río Man -Bajo Cauca antioqueño-, una metodología para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas en el acuífero libre que considere, además de la interacción de la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante, aspectos como impacto en los ecosistemas, salud de la población y la vulnerabilidad social y humana*.

Para lograr de este objetivo se desarrolló un planteamiento metodológico que involucra la determinación del peligro a la contaminación y su interacción con la vulnerabilidad humana. En este sentido es primordial aproximarse al conocimiento del sistema hidrogeológico, conocer sus características físicas e hidráulicas, identificar y caracterizar las fuentes potenciales de contaminación, aproximarse a un índice de vulnerabilidad humana frente a un evento de contaminación de las aguas subterráneas e interactuar con cada una de ellas para la determinación del riesgo de contaminación.

Durante la ejecución del presente trabajo se contó con el intercambio de investigadores, conocimiento y experiencia en el tema entre la Universidad de Antioquia - Colombia y la Universidad Nacional del Mar del Plata – Argentina, gracias al Programa de Cooperación Científico-Tecnológico entre el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina (MINCYT) y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS), en el marco del proyecto "Estrategias de gestión del riesgo de contaminación de acuíferos freáticos en áreas peri-urbanas y rurales. Aplicabilidad, análisis, potencialidades y restricciones en dos países de América Latina".

El informe del trabajo de investigación se encuentra organizado en cinco capítulos. En el capítulo 1 se presentan las generalidades del proyecto, las cuales incluyen: la descripción de la zona de estudio, el planteamiento del problema, los proyectos realizados en el Bajo Cauca antioqueño a manera de antecedentes y finalmente se presentan los objetivos del trabajo de investigación y una idea preliminar de cómo abordar el trabajo para su cumplimiento.

En el capítulo 2 se hace referencia al marco teórico, basado específicamente en el entendimiento de los conceptos: recurso hídrico, contaminación, peligro, vulnerabilidad y riesgo, soportados en el estado del arte correspondiente al proyecto; adicionalmente se hace una breve reseña sobre el modelo hidrogeológico conceptual de la zona.

El capítulo 3 se expone la propuesta metodológica de evaluación de los componentes del riesgo de contaminación, abordando en primera instancia la definición del modelo hidrogeológico conceptual, el cual se convierte en el insumo primordial para avanzar en la obtención de la vulnerabilidad intrínseca del medio acuífero. Luego se aborda la determinación del índice de carga contaminante, según las características de clase, intensidad, modo de disposición y tiempo de aplicación del contaminante. Se plantea una metodología para obtener el peligro, interactuando la vulnerabilidad intrínseca con el índice de carga contaminante. Se desarrolla un esquema metodológico para la obtención del índice de vulnerabilidad humana, basado en las características propias de la población y de su entorno, como la exposición, la fragilidad socio-económica y la falta de resiliencia. Finalmente se propone una metodología para integrar el peligro y la vulnerabilidad humana para obtener el riesgo a la contaminación y se presenta una descripción de la información y de las herramientas requeridas para el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de la aplicación de la propuesta metodológica en la zona de estudio partiendo de la determinación de los índices de

vulnerabilidad intrínseca, carga contaminante, peligro ya determinados y evaluando la vulnerabilidad humana y el riesgo. Los resultados obtenidos fueron representados espacialmente utilizando la vereda como unidad espacial de análisis. Por último se hace un análisis general de las situaciones de riesgo que se presentan en la zona de estudio.

Finalmente en el capítulo 5 se sintetizan los análisis y las conclusiones correspondientes al trabajo de investigación.

1. GENERALIDADES

Adivinanza:
En medio del mar me encuentro,
a orillas del agua estoy,
en rio no me hallarán.

La letra A

1. GENERALIDADES

Con la finalidad de contribuir con una herramienta para la adecuada planificación y protección de los recursos naturales, en este caso del recurso hídrico subterráneo, el cual hace parte fundamental de la organización de una comunidad y por lo tanto de su territorio, se ha planteado el trabajo de investigación: "Desarrollo y aplicación de una metodología para evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas en un acuífero libre, caso de estudio: cuenca baja del río Man, Bajo Cauca antioqueño".

En este primer capítulo se retoma la propuesta de investigación avalada por el Comité de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la Universidad de Antioquia, realizando una descripción de la zona de estudio y exponiendo los motivos que permitieron soñar y formular esta investigación. En el numeral 1.1 se realiza una descripción del área de estudio, destacando sus características geográficas, económicas y sociales. En el numeral 1.2 se plantea el problema y la justificación para formular y desarrollar la presente investigación, haciendo énfasis en la utilidad que representa para la gestión de las aguas subterráneas y del territorio. En el apartado 1.3 se presentan los antecedentes, referidos a los estudios realizados en la zona y los avances con relación al entendimiento del tema sobre riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. En el numeral 1.4 se exponen los objetivos que orientan el desarrollo de la investigación y, finalmente, en el apartado 1.5 se bosqueja un derrotero general de actividades precursoras de la propuesta metodológica.

1.1. La zona de estudio

1.1.1. Antioquia y su Bajo Cauca

El departamento de Antioquia tiene una superficie de 63.612 km^2 y está situado al noroeste de Colombia, limita por el Norte con el mar Caribe y los departamentos de Córdoba y Bolívar; por el Este con Bolívar, Santander y Boyacá; por el Sur con Caldas y Risaralda y por el Oeste con el departamento del Chocó. En el censo realizado en el año 2005 se reporta una población para el territorio antioqueño de 5.962.885 personas viviendo en 125 municipios, los cuales a su vez están agrupados en 9 subregiones: Bajo Cauca, Magdalena Medio, Nordeste, Norte, Occidente, Oriente, Suroeste, Urabá y el Valle de Aburra. (Figura 1-1).

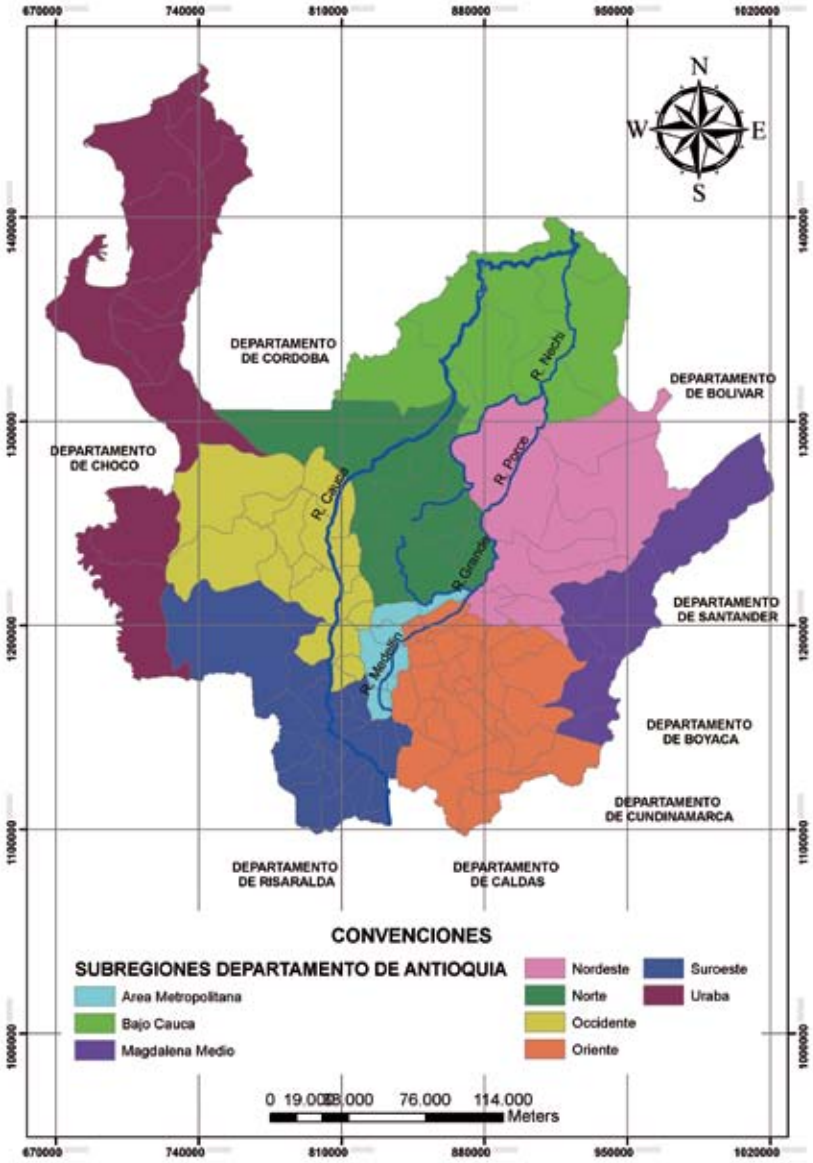


Figura 1-1 Mapa de localización de Antioquia y Bajo Cauca

La zona de estudio específicamente se encuentra ubicada en la subregión del Bajo Cauca antioqueño. Esta subregión tiene una extensión de 8.485 km^2 y está localizada al Norte del departamento de Antioquia en las últimas estribaciones de las cordilleras Central y Occidental de los Andes colombianos, en límites con los departamentos de Sucre, Córdoba y Bolívar. La subregión del Bajo Cauca antioqueño está conformada por seis (6) municipios: Caucasia, Cáceres, El Bagre, Nechí, Taraza y Zaragoza. De acuerdo con las proyecciones de población municipales 2005-2009 realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE- (Tabla 1-1) para el año 2009 se tendría una población de 264.624 habitantes. En promedio para la subregión, el 59% de la población habita en zona urbana y el 41% en área rural pero para los casos específicos de Caucasia y Cáceres, en los cuales se encuentra situada la

zona de estudio, la situación difiere un poco: Caucasia presenta el 19% de la población asentada en el área rural y Cáceres tiene el 78%. Fisiográficamente se registran alturas entre 30 y 1.000 metros sobre el nivel del mar y se caracteriza por su clima cálido y húmedo que, unido a su riqueza hidrográfica, convierten el Bajo Cauca en una región con suelos húmedos ricos en flora y fauna.

Municipio	Total	Cabecera	Rural	% Cabecera	% Rural
Caucasia	96.871	78.576	18.295	81%	19%
Cáceres	32.178	7.186	24.992	22%	78%
El Bagre	47.514	25.156	22.358	53%	47%
Nechí	22.902	11.808	11.094	52%	48%
Tarazá	36.682	21.016	15.666	57%	43%
Zaragoza	28.477	13.127	15.350	46%	54%
Total	**264.624**	**156.869**	**107.755**	**59%**	**41%**

Tabla 1-1 Proyección de la población para el año 2009 en la subregión

El río Cauca y el río Nechí son las dos arterias fluviales de la subregión, a ellos confluyen numerosos ríos y quebradas destacándose entre ellos los ríos Man y Caserí. También presenta un complejo sistema de humedales los cuales han sido intervenidos por los habitantes. El uso de suelos predominante corresponde a pastos, seguidos por bosque natural muy intervenido, diferentes estados sucesionales, básicamente rastrojo alto y bajo, además de cultivos migratorios y suelos intervenidos por la minería (Neotrópicos y Corantioquia, 2001).

Esta región presenta grandes perspectivas de desarrollo y pone su esperanza de progreso en el mejoramiento de su infraestructura vial, conformada por carreteras tan importantes para el departamento como la Troncal de Occidente que comunica los municipios de Caucasia, Tarazá y Cáceres y la Troncal de la Paz que une a Caucasia y Zaragoza. El aprovechamiento de sus ríos facilita el transporte de carga y pasajeros hacia otros municipios ribereños y en los aeropuertos Juan H. White de Caucasia y el aeropuerto de El Bagre tiene lugar la aviación comercial con transporte de pasajeros desde y hacia Medellín (Gobernación de Antioquia, 2009).

Hoy la actividad agrícola en la zona (cultivos de arroz, maíz, plátano y yuca), se desarrolla fundamentalmente de dos maneras: de subsistencia, donde se combina con la pesca y la minería, y tecnificada, aunque con bajos rendimientos en la productividad. La actividad minera se convirtió en la década de los años 80 en la principal actividad económica, sin embargo la ganadería y el comercio se han convertido, en conjunto con la minería, en el sustento del Bajo Cauca Antioqueño (INER y Universidad de Antioquia, 2003).

1.1.2. Cuenca del río Man

La cuenca hidrográfica del río Man está ubicada en la jurisdicción de los municipios de Tarazá, Cáceres y Caucasia. La cuenca del río Man, comprende un área de aproximadamente 680 km^2. La porción de la cuenca, correspondiente a la zona de estudio -cuenca baja-, tiene una extensión de 448 km^2 y, debido a su ubicación sobre rocas sedimentarias de edad Terciaria y depósitos sedimentarios recientes, posee un importante potencial hidrogeológico que representa la única fuente segura de abastecimiento de agua para la comunidad rural asentada en la zona.

La cuenca baja del río Man constituye parte del área rural de los municipios de Cáceres y Caucasia y hacen parte de ella siete veredas y cuatro corregimientos, (Tabla 1-2 y Figura 1-2), donde habitan en promedio 16.200 habitantes (Gobernación de Antioquia, 2009). Se aclara que los límites de la cuenca no coinciden con los límites de las unidades político administrativas y por lo tanto el valor de población reportada corresponde al dato veredal (SISBEN, 2009).

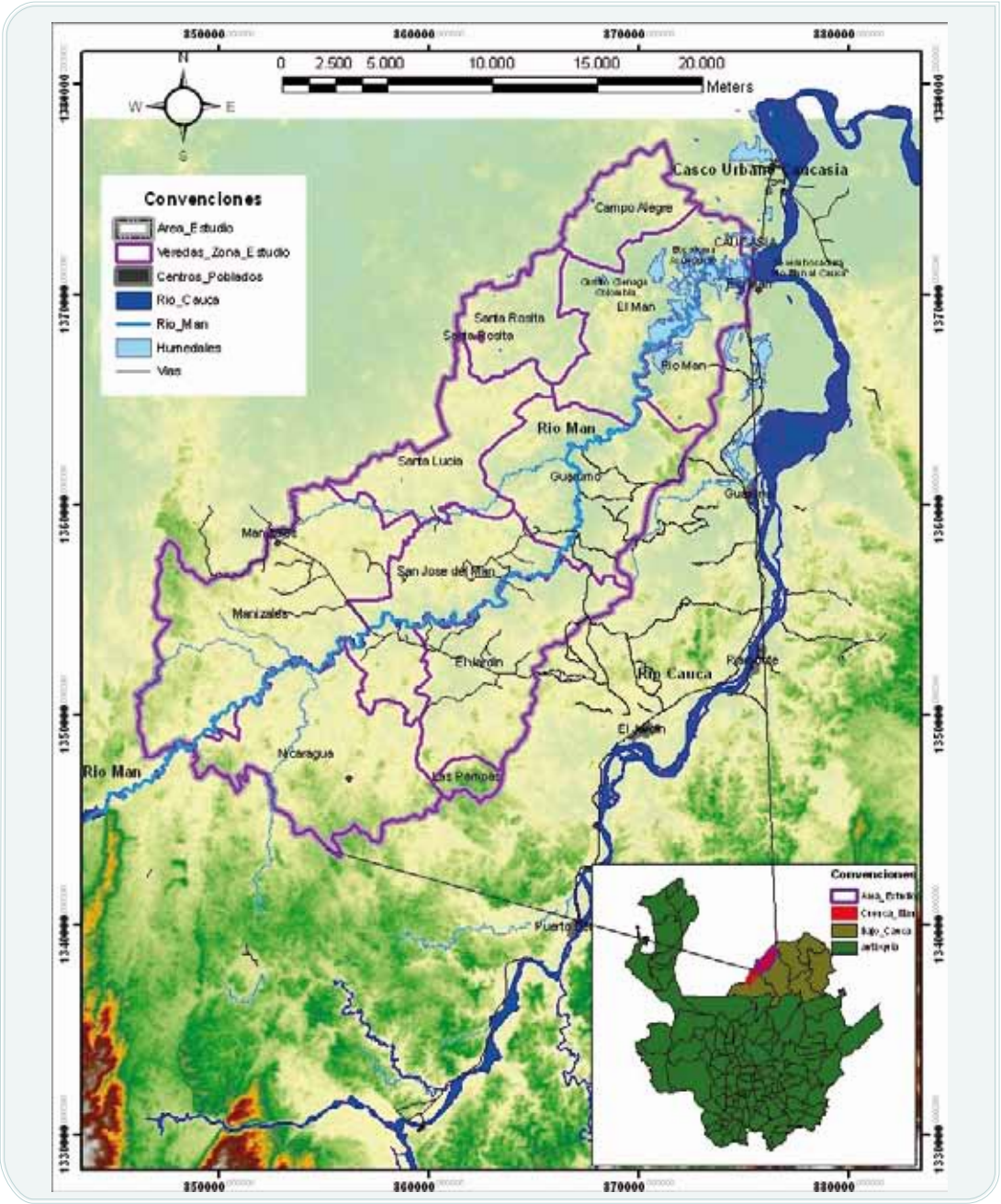


Figura 1-2 Mapa de localización de la Cuenca del río Man y la Zona de Estudio

Municipio	Unidad Político Administrativa	Nombre	Cantidad Personas (Hab)	Área (km^2)	Densidad (Hab/Km^2)
Caucasia	Corregimiento	Santa Rosita	759	33,5	22,7
Caucasia	Vereda	Campo Alegre	962	57,5	16,7
Caucasia	Vereda	El Man	*716	47,5	*15,1
Cáceres	Corregimiento	El Jardín	7.966	110,6	72,0
Cáceres	Corregimiento	Guarumo	3.171	82,5	38,4
Cáceres	Corregimiento	Manizales	565	91,8	6,2
Cáceres	Vereda	San José del Man	*671	44,5	*15,1
Cáceres	Vereda	Río Man	450	40,2	11,2
Cáceres	Vereda	Las Pampas	246	22,1	11,1
Cáceres	Vereda	Santa Lucia	428	39,9	10,7
Cáceres	Vereda	Nicaragua	249	68,6	3,6
Total			**16.183**	**638,8**	**25,3**

* Datos estimados con el área y la densidad poblacional promedio de la zona.

Tabla 1-2 Corregimientos, veredas y población de la cuenca baja río Man

Fisiográficamente la zona de estudio se caracteriza por tener dos condiciones de relieve: la primera es una zona plana, de baja inclinación y valles extensos; y la segunda es una zona media baja con pendientes moderadas y valles de poca amplitud. El río Man desemboca en el Cauca a una altura de unos 50 msnm, en jurisdicción de Caucasia aproximadamente a tres kilómetros del casco urbano, en esta región asociado al río Man se da la presencia de ciénagas y humedales (Betancur y Corantioquia, 2003).

Desde el punto de vista ambiental el territorio y los recursos comprendidos en la zona de estudio están regidos por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) creada mediante Ley 99 de 1993 y cuya función es la administración del Medio Ambiente y los recursos Naturales Renovables. La Dirección Territorial Panzenú es la encargada del Ordenamiento Ambiental del Territorio de los municipios donde se encuentra la cuenca del Man.

1.1.2.1. Aspectos hidrogeológicos de la zona de estudio

Las características del sistema hidrogeológico se han descrito, a escala regional, como resultado de diferentes estudios realizados (Corantioquia - Universidad de Antioquia 2003, 2004 y 2005, Mejía 2006, Palacio 2007 y Betancur 2008). A continuación se presentan en forma general los aspectos hidrogeológicos de la región, haciendo énfasis específicamente en la zona de estudio y tomando como referencia las descripciones realizadas por los autores mencionados.

El sistema acuífero del Bajo Cauca Antioqueño está conformado por tres unidades hidrogeológicas, son ellas la unidad hidrogeológica U123, la unidad U4 y la unidad U5.

Específicamente en la zona de estudio, en la unidad hidrogeológica U123 se conjugan los depósitos aluviales de los ríos Man y Cauca y el saprolito poco consolidado de las rocas sedimentarias del Terciario del Miembro Superior de la Formación Cerrito. La unidad U123 tiene el carácter de acuífero libre y su extensión abarca toda la planicie del área de estudio, sus mayores espesores se dan a lo largo de varias franjas

longitudinales, superando los 90 metros en los sectores de El Jardín y Río Man. A partir de una serie de datos de conductividad hidráulica se obtuvo el modelo de distribución espacial de éste parámetro según el cual el valor predominante alcanza el intervalo entre 1 y 2 m/día.

La unidad U4 subyace en toda el área de estudio a la unidad U123 y está constituida por el Miembro Medio de la Formación Cerrito. Tiene el carácter de acuitardo y los espesores varían entre los 80 y 100 metros.

La unidad U5, el Miembro inferior de la Formación Cerrito, constituye un acuífero confinado regional y tiene espesores que varían de 60 a 100 metros en la zona de estudio. Esta unidad poco explorada y explotada podría constituir una importante reserva de agua para la región.

Los balances hídricos para un escenario hidrológico promedio y para períodos representativamente secos (año 1997) y húmedos (año 1999) muestran, ponderando por unidad de suelo, magnitudes de recarga de 1273 mm/año, 982 mm/año y 1729 mm/año respectivamente. Las variaciones mensuales indican que, en condiciones hidrológicas promedio, los máximos valores de recarga se producen principalmente en septiembre y las condiciones críticas mínimas se dan en marzo.

1.1.2.2. Características económicas

El desarrollo económico de la región ha estado ligado a la agricultura y la ganadería. Hace algunos años el incremento de la actividad minera desplazó la agricultura esto propició la destrucción de por lo menos el 30% de los suelos aptos para la agricultura, convirtiéndola en un terreno sin capa vegetal, movido y rocoso. La cuenca hidrográfica del río Man ha sido reconocida desde siglos pasados por la explotación de la minería de oro, lo que ha determinado y marcado la dinámica y el estado de los recursos naturales y del territorio en general. El segundo renglón de importancia económica en la región lo constituye la ganadería, ocupando en pastos el 14% del área total del departamento, para una capacidad promedia de 0,83 cabezas/hectárea (Betancur y Corantioquia, 2003).

Otro aspecto importante en la economía de la zona es el desarrollo de una agricultura de subsistencia, realizada en pequeñas parcelas con cultivos de maíz, arroz, yuca y plátano. Esta actividad es combinada con la pesca y la minería. La comercialización de madera también constituye una actividad económica representativa de la zona.

1.1.2.3. Características educativas

De acuerdo con la información del SISBEN 2009, en la zona se presenta un bajo nivel educativo: solo el 40% de habitantes, en condición de haber terminado los estudios de primaria, lo ha hecho. Esta situación permite inferir que la cobertura en educación básica primaria y secundaria está siendo afectada por diferentes aspectos que se pueden relacionar con problemas económicos; los jóvenes se ven en la necesidad de comenzar a trabajar para generar su propio sustento y tal vez el de sus familias. A esta consideración se pueden sumar las condiciones de desplazamiento por causa del conflicto armado, las dificultades de desplazamiento hasta las instituciones educativas y las malas condiciones en la infraestructura física de las mismas.

1.1.2.4. Características de salud

En el área de la salud la cuenca del río Man presenta uno de los más bajos indicadores, relacionado con las personas afiliadas a los regímenes subsidiados y contributivo con una cobertura del 28% de la población (Gobernación de Antioquia, 2009). La salud de la población, especialmente de los niños, es deficiente; en toda la región se encuentran niveles de desnutrición aguda de la población infantil, debido a problemas de alimentación y al consumo de alimentos con bajo poder nutricional (Betancur y Corantioquia, 2003).

Del mismo modo, enfermedades como el paludismo, las infecciones intestinales y las diarreas, son frecuentes debido a la mala disposición de basuras, al manejo inadecuado de las aguas servidas y a la falta de tratamiento del agua para consumo humano.

1.1.2.5. Características culturales

Las personas que habitan la ribera del río Man son campesinos provenientes de los departamentos de Sucre, Córdoba y Bolívar o en su defecto, descendientes de los colonizadores sabaneros de esta misma región que hace más de cincuenta años vinieron a tumbar la selva para la extracción de madera y posteriormente dedicarse a la actividad agropecuaria, constituyéndose en el 70% de la población de los nuevos caseríos y centros poblados. Las familias son numerosas, conformadas por la pareja de esposos, de tres a cinco hijos y algunos familiares o allegados, lo que habla de su cordialidad y hospitalidad; son personas extrovertidas y conversadoras, orgullosas de sus costumbres costeñas. El otro 30% de la población, son nativos del departamento de Antioquia, quienes se dedicaron a la explotación ganadera y a la acumulación de tierras hasta convertir la zona en una serie de latifundios dedicados a la ganadería extensiva, los que oscilan entre 40 y 1.600 hectáreas, y que aseguran la tenencia de la tierra, los medios y el capital de producción de los ganaderos del Bajo Cauca (Betancur y Corantioquia, 2003).

1.1.2.6. Características de los servicios públicos y condiciones de saneamiento básico

De acuerdo con los valores reportados por la Gobernación de Antioquia, para el año 2007 en la zona de estudio la cobertura residencial en sistemas de acueducto es del 42%, sin embargo esto no refleja la cobertura que tiene la población en cuanto al acceso a agua potable. Es alarmante encontrar veredas en la zona de estudio como Santa Lucía, Nicaragua y Las Pampas con cobertura en servicio de acueducto inferior al 5% (SISBEN, 2009). Adicionalmente, es importante destacar que algunos de los aljibes o pozos que surten las viviendas en la cuenca del río Man han arrojado presencia de coliformes fecales en los resultados de laboratorio, al igual que otros parámetros como color, turbiedad, alcalinidad, pH, hierro total, DQO y nitritos, que están por encima de los límites admisibles establecidos en la normatividad colombiana para agua de consumo humano (Betancur, 2008). A lo anterior la autoridad sanitaria y ambiental deberán dar mayor atención y prioridad para evitar inconvenientes con la salud de la población.

Con relación al servicio de alcantarillado en la zona de estudio, la gobernación reporta para el año 2007 coberturas en promedio del 10%. Mediante una inspección de campo, recorriendo la cuenca del río Man se observan numerosas situaciones

relacionadas con condiciones poco técnicas y no convencionales de disposición final de las aguas residuales domésticas, afectando con esto la mayoría de los cuerpos de agua lénticos o lóticos de la zona. Otras técnicas más comunes y que se constataron mediante el trabajo de campo son las letrinas y los pozos sépticos, quedando algunas dudas sobre la operación y el mantenimiento de los mismos. En fin, la situación con el manejo de los vertimientos de las aguas residuales es delicada ya que no se tiene ningún tipo de control sobre los mismos, además no existen en la cuenca sistemas de tratamiento de agua residual donde se presta el servicio de alcantarillado. Todo lo anterior genera índices potenciales de carga contaminante elevados asociados al acuífero libre (Gaviria, 2005).

Para el componente de aseo la situación es muy similar y en la mayoría de los casos los residuos sólidos son manejados inadecuadamente por la falta de recolección en la zona rural, razón por la cual la comunidad toma sus propias medidas de manejo y disposición de los mismos, comúnmente arrojándolos a las corrientes superficiales, incinerándolos o enterrándolos. En las corrientes superficiales se suma la afectación por los desechos de la minería, animales muertos y químicos utilizados en las actividades agrícolas. La situación con el manejo de los residuos es preocupante ya que en algunos sitios se utilizan aljibes abandonados para la disposición de los mismos y todo lo asociado a este tipo de actividades potencialmente contaminantes, indican carga contaminante elevada (Gaviria, 2005).

1.2. Problema y justificación

El agua es un recurso natural vital para el hombre y los ecosistemas y, dentro del recurso hídrico, las aguas subterráneas constituyen un bien estratégico, aportan el caudal base de las corrientes perennes y regulan los niveles en los cuerpos lénticos, cumplen una importante función para el mantenimiento de ecosistemas acuáticos; además cada día constituyen fuentes de abastecimiento para satisfacer necesidades humanas, para consumos en actividades domésticas, agropecuarias e industriales. Lamentablemente, el recurso hídrico y por tanto el recurso hídrico subterráneo ha sido tocado por la crisis ambiental planetaria que amenaza su sostenibilidad.

Las aguas subterráneas se originan principalmente por exceso de precipitación que se infiltra directa o indirectamente a través de la superficie del suelo, constituyendo las acciones humanas en la superficie una amenaza a la calidad de ella. Las mismas causas que llevan a un deterioro progresivo del recurso hídrico superficial pueden también afectar los acuíferos, la contaminación de los acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo generada por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agropecuarias o mineras no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes la carga excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes. A escala mundial, las aguas subterráneas están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agropecuarias y la extracción minera, por ello existe una gran necesidad de llevar a cabo campañas proactivas y acciones prácticas destinadas a proteger la calidad natural del recurso, las cuales se pueden justificar sobre la base tanto de criterios amplios de sustentabilidad ambiental como de criterios más estrechos de beneficio económico (Foster *et al*, 2002).

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, destacando el agua como recurso vital fundamental para el desarrollo sostenible, en

particular para la integridad del medio ambiente y la erradicación de la pobreza y el hambre, y que es indispensable para la salud y el bienestar humano, proclamó el periodo 2005 - 2015 como el Decenio Internacional para la acción: "El agua, fuente de vida" (UNESCO, 2003). Esta declaratoria supone como objetivo primordial ocuparse más a fondo de los temas relacionados con el recurso hídrico, establecer y ejecutar programas y proyectos relativos al agua que permitan un mejor conocimiento y proporcionen elementos para la toma de decisiones relacionadas con la conservación y el mejoramiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, sin dejar de lado el saneamiento básico, que conlleven al cumplimiento de la meta propuesta para el año 2015 en la Cumbre del Milenio de las Naciones Unidas celebrada en el año 2000 en la ciudad de Nueva York de reducir a la mitad el porcentaje de personas que no tienen acceso al agua potable o no pueden costearla. La formulación de estos propósitos está inspirada en las situaciones en que viven grandes comunidades en países de América Latina, el Caribe y África, y dentro de América Latina, Colombia registra numerosos casos para ejemplificar este panorama, la región del Bajo Cauca antioqueño es uno de ellos.

La cuenca baja del río Man con 16.200 habitantes, tiene déficit en coberturas de servicio de acueducto y acceso a agua potable, y las aguas subterráneas se han convertido en la única fuente segura de abastecimiento para la comunidad siendo común encontrar pozos o aljibes en todas las viviendas, locales comerciales, haciendas y centros educativos, dándose así la explotación de agua subterránea de manera no planificada sin las medidas necesarias que garanticen su conservación (Gaviria, 2005). El número de captaciones de agua del subsuelo en la zona de estudio es superior a 290 aljibes, desde los que se extraen más de 2.835 metros cúbicos de agua al día (Corantioquia y Universidad de Antioquia, 2003).

Las características del sistema hidrogeológico se han descrito, a escala regional, como resultado de diferentes estudios realizados por investigadores e instituciones como: Corantioquia - Universidad de Antioquia 2003, 2004 y 2005, Mejía 2006, Palacio 2007 y Betancur 2008. Las condiciones de calidad de las aguas subterráneas almacenadas en el acuífero libre y los factores de amenaza sobre ella han sido caracterizados (Corantioquia y Universidad de Antioquia 2003, 2004 y 2005, Gaviria 2005, Gaviria y Betancur 2005, 2006 y Martínez 2007), la vulnerabilidad del sistema (Rueda 2006, Rueda y Betancur 2006) y el peligro de contaminación ha sido estudiado por Betancur (2008). Hoy es urgente evaluar el impacto que la posible afectación a la calidad pueda tener sobre ecosistemas y comunidades para avanzar en la gestión integral del recurso hídrico subterráneo.

De aquí se desprende una pregunta: *¿Es posible desarrollar una metodología de evaluación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas que combine variables geológicas, ecológicas y sociales, que sea de sencilla aplicación y que permita prevenir, controlar y proteger el recurso hídrico subterráneo y sus usuarios?* Para dar respuesta a esta pregunta, se adelantó el proyecto de investigación "Desarrollo y aplicación de una metodología para evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas en un acuífero libre, caso de estudio: Cuenca Baja del río Man -Bajo Cauca antioqueño-".

1.3. Antecedentes

A partir de los años sesenta se empezó a tomar conciencia de la importancia que tiene el hombre y su tecnología como elemento dinamizador del riesgo, además de receptor del mismo. La preocupación por la elevada capacidad que el hombre, cada vez

más tecnificado, tenía y tiene para interferir negativamente en el medio, fue recogida a escala internacional por la creación del Plan de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la conferencia de las Naciones Unidas sobre los recursos naturales en Estocolmo.

La gestión y evaluación de los riesgos naturales ha sido abordada tradicionalmente por geólogos e ingenieros bajo una perspectiva centrada en aspectos del medio físico, que ha derivado en una carencia de aspectos que traten el análisis de los riesgos con una perspectiva global (Pita 1999; Calvo, 2001). La percepción social de los riesgos, la vulnerabilidad del medio humano, análisis histórico-cultural de las poblaciones, valoración de las consecuencias del riesgo o la mitigación de los daños ocasionados, son aspectos a tener en cuenta en un análisis integrador del riesgo (Calvo, 2000). En esta misma línea, Perles (2004) realiza una crítica de las carencias y necesidades actuales de los trabajos de riesgo y apunta a la realización, entre otros, de estudios integrados de los distintos componentes del riesgo como una de las temáticas a desarrollar en el ámbito aplicado.

El riesgo de contaminación de aguas subterráneas constituye una línea de investigación que cuenta con una historia relativamente reciente. En el ámbito internacional se obtuvieron, a finales de la década de los sesenta, los primeros resultados en esta temática que recogían solamente la perspectiva física del problema. A finales de la década de los noventa se incorporó un nuevo aspecto en la evaluación del riesgo: la influencia del hombre como desencadenante de los procesos de contaminación y de incremento del riesgo. El avance se produce nuevamente desde el campo de la hidrogeología, pero ya se empieza a notar un incremento de geógrafos y otros especialistas de la rama de ciencias ambientales que se interesan por la cuestión (Perles *et al*, 2009).

Actualmente, y como guía práctica para el desarrollo del tema investigativo, se tiene la publicación "Protección de la calidad del Agua Subterránea" (Foster *et al*, 2002), este documento es un manual para las empresas de agua, autoridades ambientales y administraciones municipales, que sirve para definir las zonas de protección después de realizar una evaluación hidrogeológica completa, es decir, que incluya de manera estricta los conceptos de vulnerabilidad e inventario de fuentes de contaminación con la respectiva caracterización de la carga contaminante asociada a determinada actividad. Esta guía se convierte en un documento indispensable de consulta para realizar una adecuada y precisa evaluación el peligro de contaminación de las aguas subterráneas en cualquier zona de estudio. El texto presenta por primera vez la diferenciación entre peligro y riesgo, definiendo este último como las consecuencias o impactos derivados del peligro, es decir, el riesgo es evaluado mediante la interacción entre el peligro de contaminación (interacción entre vulnerabilidad intrínseca y carga contaminante) y el impacto que tiene sobre la salud humana y los ecosistemas.

Partiendo de la definición conceptual del riesgo en el tema de aguas subterráneas, autores como Massone (2009), Massone y Martínez (2008), Perles *et al* (2009), Ducci *et al* (2007), Peluso *et al* (2006), Massone y Sagua (2005) y Vías (2005) han abordado el tema dando relevancia al impacto que tienen los eventos de contaminación sobre las comunidades y su entorno. Estos aportes tienen como finalidad entregar instrumentos de gestión del riesgo, dando prioridad a las zonas de mayor vulnerabilidad humana teniendo en cuenta el comportamiento de las variables socioeconómicas y de calidad del agua.

Finalmente, relacionados con el tema de riesgo, se resaltan los trabajos "Evaluación de riesgo y el Plan de Manejo para la Protección de las aguas subterráneas en el Valle

del Cauca" (CVC, 2002), "Plan de manejo integrado de Aguas Subterráneas en Pereira y Dosquebradas" (CARDER, 2007), y, dentro de los trabajos sobre exploraciones hidrogeológicas en el Bajo Cauca Antioqueño, CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia realizaron evaluaciones de vulnerabilidad del acuífero. Mediante trabajos de investigación con estudiantes de pre y posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia se han implementado, comparado y validado, diferentes metodologías para evaluar la vulnerabilidad de sistemas acuíferos (Rueda y Betancur, 2006), se han desarrollado propuestas metodológicas novedosas para la caracterización de carga contaminante (Gaviria y Betancur, 2005, 2006) y se obtuvo una primera evaluación de peligro de contaminación de las aguas del acuífero libre (Betancur 2008).

Con lo anterior, se tienen bases de aplicación para evaluar el riesgo de contaminación del recurso hídrico subterráneo; además, se cuenta con estudios que establecen zonas de intervención prioritaria debido a la interacción entre la vulnerabilidad y la amenaza. Es por esto que evaluar el riesgo a la contaminación del recurso hídrico subterráneo es importante y necesario para emprender los planes y estrategias de gestión. De esta manera se reducirá el riesgo a que una comunidad se vea afectada por un deterioro en su calidad de vida, evitando gastos en tratamientos de enfermedades originadas por el consumo de aguas de mala calidad y gastos en unidades de potabilización del agua.

1.4. Objetivos del proyecto

El objetivo general planteado para el trabajo de investigación es:

Desarrollar y aplicar en la cuenca baja del río Man -Bajo Cauca antioqueño- una metodología para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas en el acuífero libre que considere, además de la interacción de la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante, aspectos como impacto en los ecosistemas, salud de la población y vulnerabilidad social.

Para abordar y lograr el alcance del proyecto se plantean tres objetivos específicos:

1. Adoptar un modelo de interacción entre la vulnerabilidad intrínseca (VI) y la carga contaminante (CC) para la determinación del peligro (P) de contaminación de las aguas subterráneas.
2. Adoptar un modelo de evaluación de la vulnerabilidad social (VS) y si es posible del ecosistema (VEC) en relación con los efectos de la posible contaminación de las aguas subterráneas, avanzando en el planteamiento de un modelo de valoración del recurso hídrico subterráneo.
3. Proponer una metodología para evaluar el riesgo (R) que genera la contaminación del agua en un acuífero libre.

En los siguientes capítulos se presentan los logros de esta investigación y se exponen los alcances de cada uno de los objetivos propuestos.

1.5. Premisa metodológica

Partiendo de una adecuada representación del sistema hidrogeológico, para la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas se requiere una clara identificación de las variables que intervienen y se relaciona con él y de un sólido soporte conceptual respecto a ellas. De acuerdo con las directrices propuestas por Foster *et al* (2002), la vulnerabilidad intrínseca y la carga contaminante se relacionan para obtener a partir de ellas el peligro, luego el impacto sobre comunidades y ecosistemas, manifiesta a partir de la susceptibilidad de estos a ser negativamente afectadas, dan lugar a la evaluación del riesgo. Unos y otros apuntan, paso a paso, a lograr una mejor gestión del recurso hídrico subterráneo. El esquema metodológico general planteado para la determinación del riesgo se presenta en la Figura 1-3.

Figura 1-3 Esquema metodológico para la determinación del riesgo

2. ESTADO DEL ARTE

> La vulnerabilidad humana se determina a partir de tres (3) variables principales: exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia, clasificadas en cinco clases; las cuales pueden tomar valores desde 0,2 a 1,0, considerándose 0,2 una clase muy baja, 0,4 baja, 0,6 moderada, 0,8 alta y 1,0 extrema.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan algunas bases conceptuales relacionadas con cada uno de los componentes de la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas. Algunos de ellos, como la vulnerabilidad intrínseca, están ampliamente referenciados y han sido aplicados. Otros aspectos, como la determinación del peligro, vienen siendo documentados con la aplicación de algunos casos, mientras aspectos como el de la vulnerabilidad humana asociada a un evento de contaminación del recurso hídrico subterráneo, están aún en construcción.

Con este planteamiento y relacionado a la determinación del riesgo, se inicia con la evaluación del peligro la cual comprende la determinación de la vulnerabilidad del acuífero y la caracterización de la carga contaminante. Estos componentes del riesgo han sido abordados por varios autores y se consideran en la actualidad como temas de aplicación con estructura y rutas metodológicas validadas y consolidadas. El otro componente del riesgo es la vulnerabilidad humana a un evento de contaminación de las aguas subterráneas, para la cual se realizará en este capítulo un énfasis especial, ya que se convierte en el tema principal debido a los pocos estudios que se encuentran al respecto y por la necesidad de trascender del peligro al riesgo, con el fin de priorizar las zonas que sean objetivo de acciones que permitan mejorar las condiciones de vida, relacionadas con el consumo de agua de buena calidad. Por lo tanto, es importante mencionar que los factores tenidos en cuenta para la estimación de la vulnerabilidad humana son similares a los abordados bajo el panorama de los desastres “naturales”, pero con variables asociadas al tema de recurso hídrico subterráneo y que en función de los objetivos del proyecto y debido a la semejanza con el tema, se han adoptado y adaptado los factores de exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia de la población.

Al final del capítulo se presenta una síntesis y un análisis realizado a las referencias conceptuales consultadas y utilizadas en el proyecto. Este aparte del capítulo también presenta la forma de comparar y extractar las variables y funciones que permitieron evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.

Para encarar este capítulo y para mayor comprensión del proyecto es necesario entender el riesgo como la interacción de la vulnerabilidad humana y el peligro a la contaminación.

2.1. El peligro a la contaminación y sus componentes

El peligro puede ser determinado considerando la interacción entre la vulnerabilidad del acuífero y la carga contaminante que es, será o podría ser aplicada al subsuelo (Foster *et al*, 2002). La determinación de un modelo hidrogeológico conceptual supone un grado de conocimiento y de trabajo de varios años en exploración hidrogeológica. La tesis doctoral, elaborada por Betancur (2008) plantea un derrotero metodológico para la evaluación del peligro a la contaminación de las aguas subterráneas y lo aplica a la región del Bajo Cauca Antioqueño. En la Figura 2-1 se presenta el modelo metodológico referido para la evaluación del peligro.

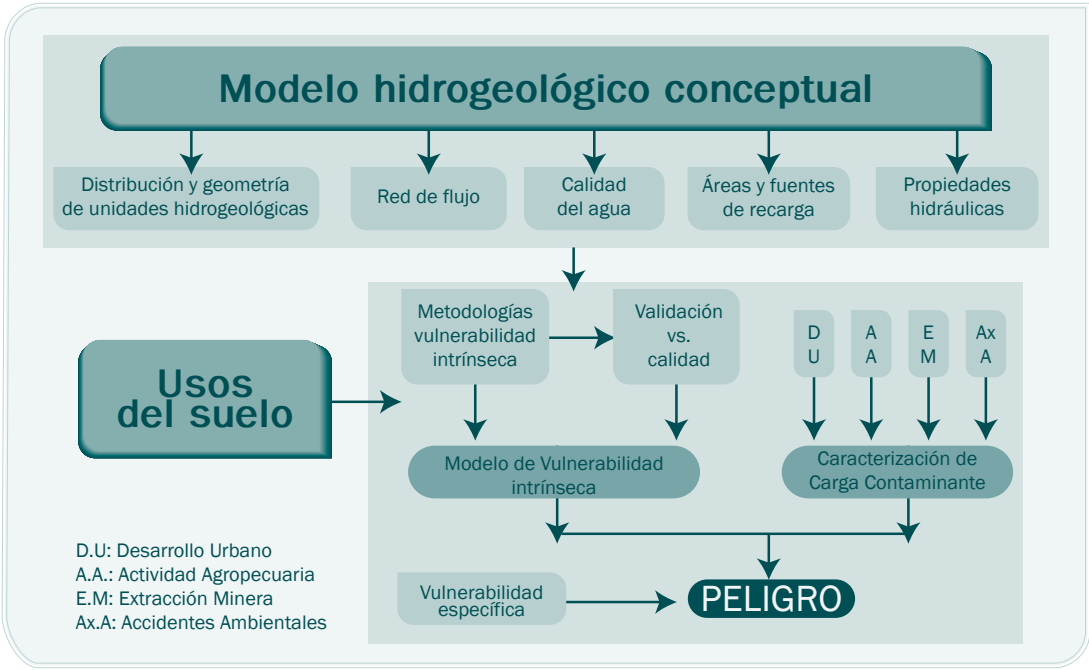


Figura 2-1 Modelo metodológico para la evaluación del peligro a la contaminación. Tomado de Betancur, 2008

2.1.1. La vulnerabilidad intrínseca

Vrba y Zaporozec (1994) en "*Guidebook on zapping groundwater vulnerability*" definen la vulnerabilidad del agua subterránea como una propiedad intrínseca del sistema que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos de origen humano o natural.

Para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero se debe conocer el modelo hidrogeológico conceptual, tener presente las propiedades naturales del medio y la disponibilidad de la información requerida para la aplicación de la metodología de evaluación. En este campo se han realizado varios estudios que dan pie a la aplicación de varias metodologías según el tipo de acuífero y se tienen en cuenta las características propias de los estratos que lo separan de la superficie del terreno (Foster *et al*, 2002).

Massone y Martínez (2008) proponen cinco etapas en la evaluación de la vulnerabilidad: 1) definición de los objetivos y la unidad de análisis territorial, 2) identificación del tipo, cantidad y calidad de la información disponible, 3) Selección de un método apropiado y la identificación del nivel de incertidumbre, 4) ejecución y evaluación de la vulnerabilidad y 5) chequear y validar los resultados.

Rueda y Betancur (2006) recomiendan, teniendo en consideración las características del acuífero objeto de estudio, que se apliquen y comparen resultados de diferentes métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y que luego se proceda con una posible validación, comparando con las condiciones de la calidad del agua en el acuífero, para así determinar el método de evaluación más adecuado. Las mismas autoras recomiendan el DRASTIC como el más útil para regiones como el Bajo Cauca antioqueño.

DRASTIC es uno de los métodos más referenciados, utilizados y probados en la actualidad, el cual fue desarrollado por Aller *et al* (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Auge, 2004). Este utiliza siete parámetros, cuyas iniciales en inglés constituyen el acrónimo que da nombre al método así: **D**epth groundwater, net **R**echarge; media **A**quifer, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of the vadose zone media, hydraulic **C**onductivity of the aquifer.

Cada parámetro de la metodología tiene su valor de importancia y cada variable un esquema de calificación. El índice de vulnerabilidad intrínseca se obtiene de la Función 2.1:

Función 2.1 $IVD = \sum_{j}^{7} W_j * R_j$ es decir:

$$IVD = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

De donde,
IVD, es el índice de vulnerabilidad DRASTIC,
D, R, A, S, T, I, C es cada parámetro considerado,
Wj, es el factor de ponderación, y
Rj, es el factor de puntuación del parámetro.

El resultado es un índice numérico que varía entre el valor 23 y 226, y determina las clases de vulnerabilidad del acuífero. (Tabla 2-1).

Intervalos del IVD	Grupo de Vulnerabilidad
> 200	Extrema alta
180-200	Muy alta
160-180	Alta
140-160	Moderada a alta
120-140	Moderada a baja
100-120	Baja
80-100	Muy baja
< 80	Extremadamente baja

Tabla 2-1 Clasificación del Índice de Vulnerabilidad DRASTIC

Para la representación mediante mapas de los resultados de la aplicación de esta metodología es necesario organizar la información en una base de datos espacial de tal manera que permita obtener los mapas temáticos según las propiedades y las valoraciones realizadas para cada parámetro. Luego, mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica –SIG–, se realiza la operación de álgebra de mapas para obtener el mapa de vulnerabilidad.

El mapa de vulnerabilidad es validado mediante la comparación con los mapas de calidad del agua en la zona, como el mapa de contenido de nitratos, que representa el grado de contaminación ya evidenciado en las aguas subterráneas (Betancur, 2008). Otros parámetros de calidad del agua como los cloruros, conductividad y sólidos disueltos totales también han sido utilizados (Báez, 2001, Lobo-Ferreira y Oliveira 2004).

Es importante mencionar que algunos investigadores han propuesto y definido cinco categorías de vulnerabilidad con el fin de superar algunas objeciones al uso indiscriminado de índices para este tipo de evaluación (Foster *et al*, 2002; Betancur, 2008 y MASSONE, *et al* 2008). La reclasificación de DRASTIC, siguiendo este criterio se presenta en la Tabla 2-2 (Rueda y Betancur, 2006).

Rango	Clase
> 200	Extrema
200-160	Alta
160-120	Moderada
120-80	Baja
< 80	Muy Baja

Tabla 2-2 Rangos y clases de índice de vulnerabilidad

2.1.2. La carga contaminante. "Amenaza"

La metodología planteada para la evaluación de la carga contaminante está orientada por las consideraciones procedimentales propuestas por Foster *et al*. (2002) y las interpretaciones llevadas a cabo por Gaviria y Betancur (2005 y 2006).

La evaluación de la carga contaminante se realiza partiendo de un inventario de las fuentes potenciales de contaminación en la zona objeto de estudio. A partir del inventario se agrupan las fuentes según su relación con seis actividades principales; i) el desarrollo urbano, ii) la actividad industrial, iii) la producción pecuaria, iv) la producción agrícola, v) la actividad minera y vi) los accidentes ambientales.

El posterior procesamiento y síntesis de la información da lugar a la identificación de las distintas categorías de carga contaminante existentes en la región. De acuerdo con el abanico de actividades y subclases propuestas en la Tabla 2-3 (Gaviria y Betancur, 2005), cada categoría tiene asociado un contaminante principal que genera un mayor impacto sobre el recurso hídrico y la comunidad, que, según sus características semi-independientes de clase, intensidad, modo de disposición y tiempo de la descarga, es valorado y relacionado mediante la función propuesta por Rueda y Ángel (2004) para la determinación del índice potencial de carga contaminante.

Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
DU Desarrollo Urbano	Saneamiento	Aguas residuales	Zona Urbana	Alcantarillado		DU01
				Lagunas de Oxidación		DU02
				Plantas de tratamiento	Corriente	DU03
					Terreno	DU04
				Descarga de Agua Residual	Corriente	DU05
					Terreno	DU06
					Laguna	DU07
			Zona Rural	Alcantarillado		DU08
				Lagunas de Oxidación		DU09
				Plantas de tratamiento	Corriente	DU10
					Terreno	DU11
				Descarga de Agua Residual	Corriente	DU12
					Terreno	DU13
					Laguna	DU14
			Zona Urbano/ Rural	Pozo séptico		DU15
				Letrina		DU16
				Zanjas		DU17
		Residuos sólidos	Zona Urbana	Relleno Sanitario		DU18
			Zona Urbano/ Rural	Botadero a cielo abierto		DU19
				Excavación		DU20
				Corriente superficial		DU21
				Aljibes abandonados		DU22
	Almacenamiento de Combustibles	En superficie				DU23
		Enterrados				DU24
	Sumideros de carretera					DU25
	Cementerios					DU26
AI Actividad Industrial	Vertimiento al Alcantarillado	Tratamiento	Descarga a corriente			AI01
			Descarga al terreno			AI02
			Descarga a laguna			AI03
		Sin tratamiento	Descarga a corriente			AI04
			Descarga al terreno			AI05
			Descarga a laguna			AI06
	Sistema de recolección de A.R	Con fugas				AI07
		Sin fugas				AI08
	Derrames accidentales	Derrame a corriente				AI09
		Derrame al terreno				AI10
		Derrame a laguna				AI11
	Disposición de residuos sólidos	Relleno Sanitario				AI12
		Botadero a cielo abierto				AI13
		Corriente Superficial				AI14
	Precipitación aérea de sustancias					AI15

Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
PA Producción Agrícola	Cultivo Extensivo	Plaguicida	Aspersión			PA01
			Irrigación			PA02
		Fertilizantes	Aspersión			PA03
			Irrigación			PA04
		Agua residuales	Aspersión			PA05
			Irrigación			PA06
	Cultivo de Pan Coger	Plaguicida	Aspersión			PA07
			Irrigación			PA08
		Fertilizantes	Aspersión			PA09
			Irrigación			PA10
		Aguas Residuales	Aspersión			PA11
			Irrigación			PA12
PP Producción Pecuaria	A_ Ganadera	Extensiva	Efluentes a Lagunas			PP01
			Efluentes al terreno			PP02
			Efluentes a corriente			PP03
		Pocas Cabezas	Efluentes a Lagunas			PP04
			Efluentes al terreno			PP05
			Efluentes a corrientes			PP06
		Excremento como abono				PP07
	A _ avícola	Industrial				PP08
		Casera				PP09
		Excremento como abono				PP10
	A_ Porcícola	Industrial				PP11
		Casera				PP12
		Excremento como abono				PP13
	A _ piscícola	Industrial				PP14
		Casera				PP15
		Excremento como abono				PP16
EM Extracción Minera	A_Minera_Metales	Cielo Abierto				EM01
		Subterránea				EM02
	A_Minera_Cantera					EM03
	A_Minera Carbón					EM04
	A_Minera Petróleo					EM05
AA Accidente Ambiental	Derrames	Laguna				AA01
		Suelo				AA02
		Corriente				AA03
	Animales	Vivos				AA04
		Muertos				AA05
	Materiales Extraños					AA06

Tabla 2-3 Actividades, subclases y categoría de carga contaminante

A continuación se presenta la Función 2.2 que permite obtener el ICC y se presenta la síntesis de valoración y clasificación, en la Tabla 2-4.

Función 2.2.

$$ICC = CIFC * V_rC + CIFI * V_rI + CIFM * V_rM + CIFT * V_rT$$

De donde, ICC, es el índice Potencial de Carga Contaminante, CIFC, CIFI, CIFM y CIFT son los coeficientes de importancia de los factores clase, intensidad, modo disposición y tiempo, y VrC, VrI, VrM y VrT, son los valores relativos asignados a la clase, intensidad, modo disposición y tiempo.

Rango	Clase ICC	Amenaza	Color leyenda
1,00 – 0,61	Alto	Alta	Rojo
0,61 – 0,31	Moderado	Moderada	Naranja
0,31 – 0,00	Bajo	Baja	Verde

Tabla 2-4 Rangos y clases de índice potencial de carga contaminante x y Betancur, 2005 y 2006

2.1.3. El peligro a la contaminación

El término peligro a la contaminación hace referencia a la probabilidad que un acuífero experimente impactos negativos a partir de una actividad antrópica dada hasta un nivel tal que el agua subterránea se torne inaceptable para el consumo humano (Foster *et al*, 2002). La mayoría de las referencias bibliográficas disponibles hasta 2001 hacían referencia al riesgo de contaminación y a partir del año 2002 fue definido como peligro a la contaminación, entendido como la interacción entre la vulnerabilidad del acuífero y la carga contaminante (Foster *et al*, 2002). Los autores del término proponen de forma práctica que la determinación del peligro puede realizarse en cualquier zona mediante la superposición del mapa de vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero con los resultados del inventario de cargas contaminantes, y plantean un esquema conceptual para la evaluación, el cual es presentado en la Figura 2-2.

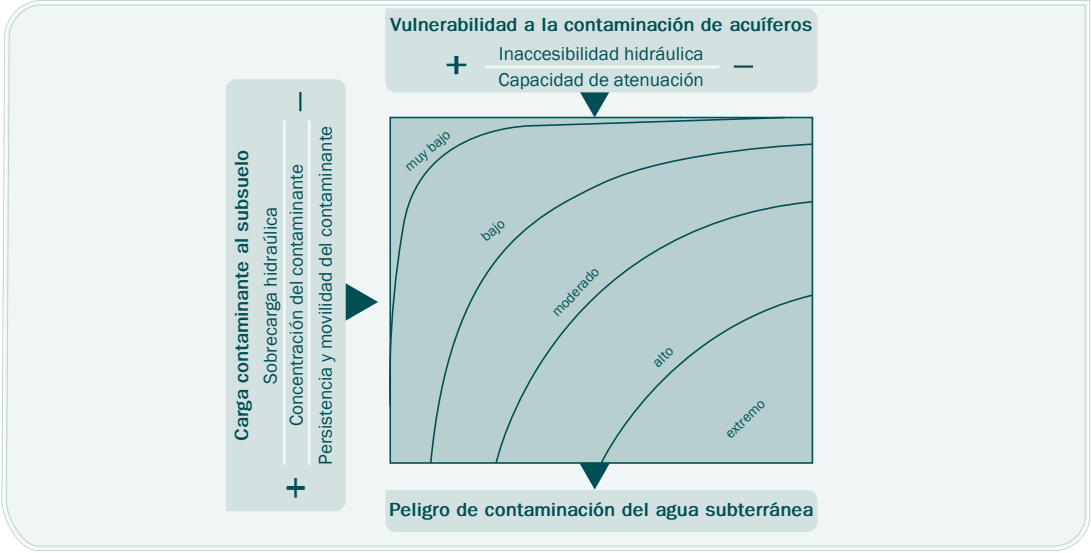


Figura 2-2 Esquema conceptual para la evaluación del peligro de los recursos hídricos subterráneos. Tomado de Foster et al, 2002

Nguyet y Goldscheider (2006) propusieron una matriz para obtener el peligro de contaminación, luego Betancur (2008) mantiene la idea de matriz y retoma la clasificación expuesta por Foster *et al* (2002) de peligro, extremo, alto, moderado, bajo y muy bajo, como se presenta en la Tabla 2-5.

La evaluación del peligro hoy en día es un prerrequisito esencial para la protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que identifica aquellas actividades potencialmente contaminantes que tienen la mayor probabilidad de impactar negativamente el sistema acuífero, indicando las zonas de priorización para la aplicación de medidas de control y mitigación requeridas.

Amenaza	Vulnerabilidad				
	Extrema	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Alta	Extremo	Alto	Alto	Moderado	Bajo
Moderada	Alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Baja	Alto	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo

Tabla 2-5 Matriz de interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. (Adaptada de Nguyet y Goldscheider, 2006 por Betancur, 2008

2.2. La vulnerabilidad humana

Cuando se habla de vulnerabilidad humana ante un evento de peligro, es obligatorio hacer una reflexión en los antecedentes investigativos, y de esta forma es prioritario mencionar los avances realizados en América Latina con relación al tema.

A partir de 1970 comienzan los estudios en América Latina de los impactos de eventos naturales de gran magnitud como terremotos e inundaciones, y sobre la respuesta social e institucional ante los mismos (Mascrey, 1993). Es de resaltar que estos estudios fueron realizados por investigadores extranjeros y los resultados fueron publicados en otros idiomas y muy pocos difundidos en los países afectados. En la década del 80 debido a la ocurrencia de varios eventos catastróficos, específicamente en Colombia y México, se generó en varias instituciones de investigación y centros de promoción del desarrollo la obligación de interpretar e investigar las situaciones en las cuales estaban envueltas las poblaciones afectadas.

Con la necesidad de generar espacios comunes de discusión interinstitucional e interdisciplinaria, presentar soluciones y medidas acordes a las necesidades de cada región y tratando de superar algunas limitaciones en el tema, se creó en la década de los 90, La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Como fruto del primer trabajo realizado por La Red, se publicó una compilación de estudios llamado “Los Desastres no son naturales” donde varios autores presentan las pautas que llevan a la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad de la población y el riesgo. Entre los autores se destacan Gustavo Wilches Chaux, Omar Dario Cardona, Virgina García, Allan Lavell, Jesús Manuel Macias, Andrew Mascrey y Gilberto Romero quienes comparten como eje común una exploración conceptual y metodológica, siempre desde una perspectiva social, la cual aún continúa en construcción.

Wilchex Chaux en 1993, define claramente a la vulnerabilidad como la incapacidad de una comunidad para absorber, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su inflexibilidad o incapacidad para adaptarse

a ese cambio. La vulnerabilidad en sí misma constituye un sistema dinámico, es decir, que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características (internas y externas) que convergen en una comunidad particular. El resultado de esa interacción es el "bloqueo" o incapacidad de la comunidad para responder adecuadamente ante la presencia de un riesgo determinado, con las respectivas consecuencias". A esa interacción de factores y características se le da el nombre de vulnerabilidad global (Wilchex Chaux, 1993). Con el fin de evaluar la vulnerabilidad global Chaux propone dividir la vulnerabilidad global en varias vulnerabilidades: natural, física, económica, social, política, técnica, ideológica, cultural, educativa, ecológica e Institucional.

Acogiendo esta definición de vulnerabilidad global se hace necesario efectuar una búsqueda de estudios a nivel mundial que tengan relación o hagan referencia con las variables socioeconómicas que permiten evaluar la vulnerabilidad y en consecuencia el riesgo ante un evento de carácter peligroso. A continuación se presentan en orden cronológico algunas de las referencias consultadas que fueron tenidas en cuenta para la construcción de la metodología de evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.

El Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 1990), define el desarrollo humano como el aumento de las opciones para que los habitantes de un país puedan mejorar la vida, e igualmente plantea una serie de índices que permiten evaluar el Desarrollo Humano en diferentes países. Estos índices se relacionan principalmente con indicadores de longevidad, nivel educacional y nivel de vida. De igual manera el Banco Mundial anualmente provee datos relacionando las condiciones ambientales con el bienestar de las poblaciones, especialmente en países en desarrollo para monitorear el progreso nacional hacia un futuro sustentable[1].

Cutter *et al* (2003) parten de un compendio de varios años sobre indicadores sociales y ambientales trabajados por varias instituciones y agencias a nivel internacional sobre el tema de la vulnerabilidad social a fenómenos peligrosos y presentan una serie de variables que influyen en la vulnerabilidad de la población entre los cuales se destacan las condiciones socioeconómicas que permiten de alguna manera absorber las pérdidas generadas ante un evento de peligro, la edad debido a las condiciones de sensibilidad presentadas en los niños y ancianos, la educación ligada estrechamente con las condiciones socioeconómicas y con el entendimiento de las consecuencias y acciones que se deben implementar, el crecimiento de la población y el acceso servicios de salud, entre otros.

En este mismo año, el Banco Interamericano de Desarrollo en el programa de información e indicadores de gestión de riesgos de desastres naturales, presenta un marco teórico de los indicadores e índices ambientales con el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia. En este documento se presentan los diferentes tipos de indicadores ambientales, los cuales están basados en series de datos específicos o series estadísticas que miden algunos componentes, procesos o tendencias de interés, que son básicamente el deterioro ambiental o la insostenibilidad. El Ministerio de Ambiente de Colombia en el 2002, define un indicador ambiental como "una variable que ha sido socialmente dotada de un significado añadido al derivado de su propia configuración científica, con el fin de reflejar de forma sintética una preocupación social con respecto al medio ambiente e insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones". Los casos pueden variar en cantidad o calidad, y por lo tanto, las variables pueden ser clasificadas como cuantitativas o cualitativas.

1 Ver www.bancomundial.org fecha de consulta. 2009

En torno a la vulnerabilidad de la población ante un evento de contaminación de las aguas subterráneas, Perles *et al* (2009) y Vías (2005) proponen factores de exposición y resistencia. La variable utilizada para medir la exposición es la cantidad de personas dependientes del agua subterránea y como variables de resistencia se utiliza el tipo de infraestructura de abastecimiento (exclusiva, complementaria o alternativa) y el número de personas especialmente vulnerables en función de la edad. En términos generales se plantea una función matemática que integra la variable exposición con las dos variables de resistencia, clasificando la vulnerabilidad de la población en cinco clases; muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Entre las variables socioeconómicas que se utilizan en los estudios del recurso hídrico, referidos a la calidad del agua, se utilizan variables relacionadas a los aspectos educativos, de salud e ingresos económicos, mediante análisis multicriterio. Cada variable utilizada se convierte en criterio al ser normalizada por el total de población, de viviendas o de hogares, según la variable, y luego se pondera por la "distancia" a valores referenciales, surgidos del Índice de Desarrollo Humano del PNUD, según el método ideado por Goncalves y Pereira (2002). (Función 2.3.)

Función 2.3.

$$Cri = \left({}^{V}/_{T}\right) * 100$$

Donde,
Cri = criterio,
V es el valor de la variable;
T es el total de población, de viviendas o de hogares, según la variable.
El valor máximo que puede adoptar: 100

Este método exige que cada criterio tenga un nivel de ponderación que representaría la contribución de cada uno a la composición de una alternativa referencial. Las variables utilizadas y el modo de asignación de pesos están basados en los índices de Desarrollo Humano del PNUD.

En el informe sobre Desarrollo Humano: "La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido" publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo para el periodo 2007-2008, se presentan los indicadores para medir el progreso en cuanto a los objetivos del milenio, específicamente al objetivo 7 "*Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente"* y la Meta 10: Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas que carecen de acceso sostenible a agua potable y saneamiento básico, se plantean dos indicadores: 1)Proporción de la población con acceso sostenible a una fuente de agua mejorada, rural y urbana y 2) Proporción de la población con acceso a saneamiento mejorado, rural y urbana.

Finalmente en el tema de la vulnerabilidad humana en el año 2005 se construye un sistema de indicadores para la gestión del riesgo programa para países de América Latina y El Caribe, financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), proyecto que fue coordinado por el Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia a cargo de Omar Darío Cardona, el cual tiene como propósito dimensionar la vulnerabilidad y el riesgo, usando índices relativos a determinada escala para facilitar a los tomadores de decisiones el acceso a información relevante que les permita identificar y proponer acciones efectivas de gestión del riesgo, considerando aspectos económicos, sociales, institucionales y técnicos. En este sistema se destaca la utilización del índice de vulnerabilidad prevalente (IVP), constituido por una serie de indicadores que caracterizan las condiciones predominantes de vulnerabilidad en términos de exposición en áreas propensas, fragilidad socioeconómica y la falta de

resiliencia social en general; aspectos que favorecen el impacto físico directo y el impacto indirecto e intangible en caso de presentarse un fenómeno peligroso.

Este índice refleja aspectos relacionados con el desarrollo de una población. El IVP propuesto por el IDEA de la Universidad Nacional (2005) se obtiene como el promedio de los tres tipos de indicadores, como se presenta a continuación en la Función 2.4:

Función 2.4. $$IVP = \frac{\left(IVP_{exposición} + IVP_{fragilidad} + IVP_{resiliencia}\right)}{3}$$

Donde,
IVP, es el índice de Vulnerabilidad Prevalente, y los demás se relacionan con la exposición, fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia.

Cada aspecto es un conjunto de indicadores que expresa situaciones, causas, susceptibilidades, debilidades o ausencias relativas del país, la región o la localidad donde se valora, hacia cuales se pueden orientar las acciones de reducción del riesgo.

A continuación se presenta un análisis y una síntesis del marco referencial presentado anteriormente con el ánimo de ilustrar el trabajo de consolidación y extracción de la información relevante que permite obtener un índice vulnerabilidad humana.

2.2.1. Componentes de la vulnerabilidad humana y sus variables

En la construcción de un marco conceptual adecuado para la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, debe hacerse énfasis en la agrupación de variables debido a la interdisciplinariedad de conceptos en el tema de la vulnerabilidad de la población a eventos que acarrean peligro para la misma. Con el ánimo de presentar la forma de construcción de la propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad humana se presenta la siguiente discusión.

Debido a la cantidad de variables utilizadas por los diferentes autores y la diferenciación que se tiene en los objetivos planteados en cada objeto de estudio referenciado, es conveniente plantear una matriz de observación y comparación entre ellos. En este caso se fundamentó el trabajo de síntesis partiendo de la definición de la vulnerabilidad global y cada una de las vulnerabilidades que la componen: natural, física, económica, social, política, técnica, ideológica, cultural, educativa, tecnológica e institucional presentada por Wilches-Chaux, en 1993. Vale la pena precisar que todas las vulnerabilidades mencionadas están interconectadas entre sí, y que para el mejor entendimiento y aplicación se deben concebir cada una como función de las demás.

La matriz de comparación fue construida para cada una de las vulnerabilidades mencionadas y se realizó con los trabajos sobre la materia. La estructura de la matriz se compone del tema específico que trata cada trabajo, el año, país de realización y el abanico de variables utilizadas.

Como ejemplo se presenta la matriz utilizada para la vulnerabilidad natural, la cual indica que todo ser vivo por el hecho de serlo posee una vulnerabilidad intrínseca determinada por los límites ambientales dentro de los cuales es posible la vida, y por las exigencias internas de su propio organismo. En la matriz se ponen las variables que son utilizadas por los autores en cada proyecto, permitiendo así indicar en cuales hay coincidencia en el uso. El caso específico de la primera variable presentada “edad de la población”, la cual es referenciada en las temáticas de aguas, indicadores y

desastres, siendo utilizada en Europa, Norte y Sur de América, por cinco autores. En esta misma matriz (Tabla 2-6) se puede visualizar la importancia que tiene la variable, "cantidad de población expuesta", la cual es utilizada por la mayoría de los autores en consideración, es decir, esta variable abarca las temáticas de aguas, indicadores, desastres y normas a nivel mundial.

De esta misma manera fueron revisados los demás componentes de la vulnerabilidad global (Anexo A), permitiendo obtener las variables que son más representativas en la evaluación de la vulnerabilidad humana y generando un grupo de variables que se relacionan directamente con el tema de contaminación del recurso hídrico subterráneo. Este ejercicio fue complementado con el análisis en primera instancia de la disponibilidad de la información, representatividad y facilidad en el manejo e interpretación de la misma y luego con el posible orden de reacción en la comunidad, en el caso que el evento de contaminación de las aguas subterráneas se presentara, facilitando el planteamiento para el análisis de la vulnerabilidad humana como un modelo de exposición y respuestas. En el primer elemento, se considera lo relacionado a la exposición de la población y en el segundo, aquellas variables que permiten medir de manera aproximada mediante indicadores, las condiciones de la comunidad y su entorno para enfrentar y responder a un evento de contaminación del recurso hídrico subterráneo (Tabla 2-7).

De esta manera, a partir de la comparación y el análisis de las variables utilizadas, se priorizó y se sintetizó que la evaluación de la vulnerabilidad humana a la contaminación de las aguas subterráneas deberá comprender las variables para estimar la exposición, la fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia, como se describe a continuación:

2.2.1.1. La exposición

En el caso de exposición y/o susceptibilidad física, los indicadores que reflejan mejor la condición son población susceptible, activos, inversiones, producción industrial y actividades económicas. Las tasas de crecimiento y la densidad poblacional, agrícola o urbana también son considerados indicadores adecuados para este tipo de índice. Estar expuesto y ser susceptible es una condición necesaria para que exista el riesgo.

Variable/ Autores	Perles	Vías	Peluso	Ducci	Massone	Othax	Calderón	Cutter	UN-IDEA	PNUD	Chaux	Ecuador	Chardon	Darmen	Total
Año	2009	2005	2006	2006	2009	2008	2008	2003	2005	2008	1993	2005	2008	2003	
Tema	AGUAS							INDICADORES			DESASTRES			NORMAS	
País	ESP	ESP	ARG	ITA	ARG	ARG	ARG	EEUU	COL	MUN	COL	ECU	COL	FRA	
Edad de la población	X	X				X		X			X				5
Cantidad de niños menor de 6 años	X	X				X									3
Cantidad de población sensible (niños y ancianos)	X	X				X		X			X			X	6
Cantidad de población expuesta	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	13
Nutrición						X				X	X				3
Clima, volumen de Consumo de agua (tasa de ingesta)						X					X				2
Tasa de ingesta						X									1
Frecuencia						X									1
Duración de exposición						X									1
Peso corporal						X									1
Índice de esperanza de vida										X					1

Tabla 2-6 Matriz de observación y comparación de variables, para la vulnerabilidad natural

Variable/ Autores	Perles	Vías	Peluso	Ducci	Massone	Othax	Cutter	UN-IDEA	PNUD	Chaux	Ecuador	Chardon	Darmen	Total
Año	2009	2005	2006	2006	2009	2008	2003	2005	2008	1993	2005	2008	2003	
Tema	AGUAS						INDICADORES			DESASTRES			NORMAS	
País	ESP	ESP	ARG	ITA	ARG	ARG	EEUU	COL	MUN	Col	ECU	COL	FRA	
1. EXPOSICION														
Cantidad de población expuesta	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	13
Cantidad de población sensible (niños y ancianos)	X	X				X	X			X			X	6
2. RESPUESTA SOCIAL														
Cantidad de jefes de hogar con bajo nivel educativo			X				X	X	X	X	X	X		7
Presencia de organizaciones sociales	X				X		X	X		X	X	X		7
Cantidad de población con ingresos hasta “cierto nivel”		X	X			X	X		X	X				6
Acceso a servicios de salud			X			X	X		X	X	X			6
Acceso a servicios de educación			X				X	X	X	X	X			6
Número de empleos		X				X	X			X	X			5
Cobertura del servicio de agua			X			X	X			X				4
Cantidad de habitantes sin cobertura médica			X			X	X			X				4
Existencia de programas de saneamiento básico							X			X		X		3
Programas de educación ambiental					X					X			X	3
Accesibilidad de la población a un punto de suministro alternativo	X	X												2
Desarrollo y eficacia de planes de emergencia en caso de contaminación	X									X				2
Percepción de la comunidad frente a la importancia del agua	X												X	2

Tabla 2-7 Matriz de síntesis, sobre variables de exposición y respuesta

El factor de la exposición está directamente relacionado con la cantidad de población dependiente del recurso hídrico subterráneo, es decir el valor de exposición es obtenido según el valor de la densidad poblacional como se presenta a continuación en la Función 2.5:

Función 2.5.

$$Exp = \frac{Cantidad\ Población\ (hab)}{Área\ (km^2)}$$

2.2.1.2. La fragilidad socioeconómica

Con relación a la fragilidad socioeconómica se tienen indicadores de pobreza, inseguridad humana, analfabetismo, desempleo, degradación ambiental, entre otros, los cuales reflejan debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos. Las variables para el índice de fragilidad socioeconómica captan en general una predisposición adversa e intrínseca de la sociedad ante la acción de un evento peligroso. (Universidad Nacional e IDEA, 2005).

La fragilidad socioeconómica se puede considerar como el primer escalón que condiciona una respuesta ante un evento de contaminación y está determinada por la interacción que se genera entre las variables: cobertura en servicio de acueducto, el nivel educativo, el nivel de ingresos, la cobertura en servicios de salud y la cultura.

Las variables consideradas permiten inferir en este trabajo de investigación lo siguiente: una población que cuente con servicio de acueducto tiene mayor posibilidad de recibir un agua de mejor calidad, ya que tienen posiblemente un ente operador responsable del servicio y por lo tanto una infraestructura adecuada para la prestación del mismo. Una comunidad preparada académicamente puede tener algunas nociones sobre algunos tratamientos no convencionales que pueden aplicarse al agua cuando no está en condiciones potables o seguras para el consumo humano; también puede de alguna manera, identificar la necesidad de proteger y realizar limpiezas periódicas en el punto de captación o el sitio de almacenamiento del agua. Tener acceso a recursos económicos puede facilitar la compra de pequeños sistemas de tratamiento, por ejemplo filtros que mejoren la calidad del agua, permite también pagar algún medio de transporte para buscar algún servicio médico, pagar por la atención recibida y/o construir una fuente alterna para el abastecimiento, entre otros. La cobertura en servicios de salud indica el acceso que tiene la comunidad a ellos, lo cual implica que ante una enfermedad generada por el consumo de agua subterránea contaminada pueda ser diagnosticada y tratada. Finalmente el aspecto relacionado con la cultura y tal vez el más complicado de estimar por su propia definición, la cual es muy amplia e involucra varios aspectos, lleva a delimitarla bajo la perspectiva del presente trabajo, en la relación del ser humano con la importancia, uso y valoración que hacen del recurso hídrico subterráneo.

Una población presentará fragilidad socioeconómica extrema ante un evento de contaminación de las aguas subterráneas cuando se combinen: baja cobertura en el servicio de acueducto, bajo nivel de ingresos, bajo nivel educativo, baja cobertura en servicios de salud y no se de importancia al recurso hídrico subterráneo.

2.2.1.3. La falta de resiliencia

En cuanto a la falta de resiliencia, se pretende valorar la existencia o no de posibles programas y acciones que pueden aportar a absorber o recuperarse frente a las consecuencias de un evento de contaminación de las aguas subterráneas. Este factor es medido por la interacción entre la existencia de los programas de gobierno enfocados al desarrollo, conservación y ordenamiento del territorio, los programas de atención y prevención de emergencias, los programas de educación ambiental, la presencia de organizaciones sociales y las fuentes alternativas de abastecimiento de agua.

El último factor considerado es la falta de resiliencia definida en el presente trabajo de investigación como el inverso de la capacidad de la población para recuperarse

o absorber un posible evento de contaminación de las aguas subterráneas, en otras palabras, se trata de la debilidad de la población. Este factor puede representarse con indicadores relacionados con el nivel de desarrollo humano, el capital humano, la redistribución económica, la gobernabilidad, la percepción colectiva, la preparación para enfrentar situaciones de crisis y la protección ambiental, los cuales podrían facilitar la identificación y la orientación de las acciones que se deben promover, fortalecer o priorizar para lograr un mayor nivel de seguridad (IDEA Universidad Nacional de Colombia, 2005). Estos indicadores son variables que captan de manera macro la capacidad para recuperarse o absorber el impacto de un evento peligroso, cualquiera sea la severidad y naturaleza del mismo.

Las variables consideradas permiten inferir en este trabajo de investigación lo siguiente: la existencia de programas relacionados con las temáticas de ordenamiento y saneamiento del territorio, la educación ambiental, prevención y atención de emergencias, permiten inferir que la comunidad cuenta con herramientas de planificación para recuperarse o absorber un evento de contaminación de las aguas subterráneas. La existencia de fuentes alternas de abastecimiento, teniendo en cuenta el estado de construcción, operación y/o administración también sirven de indicativo para este componente de la vulnerabilidad humana, ya que al presentarse un evento de contaminación de los puntos de captación, existe la posibilidad de utilizar una fuente alterna para suplir la necesidad de agua en la zona. Por último, la presencia de organizaciones sociales indica un posible puente entre los entes gubernamentales y la población, igualmente puede representar unión, trabajo en equipo, lo cual facilitaría la gestión para implementar proyectos y actividades que estén incluidos en los instrumentos de planificación mencionados anteriormente.

Una población presentará falta de resiliencia extrema o debilidad extrema ante un evento de contaminación de las aguas subterráneas cuando se combinen la ausencia de: programas relacionados con el ordenamiento y saneamiento del territorio, educación ambiental, prevención y atención de emergencias, fuentes alternas de abastecimiento y organizaciones sociales.

2.2.1.4. Una función que integra los componentes de la Vulnerabilidad humana

Para abordar el tema de la vulnerabilidad humana es necesario recordar que el objetivo del trabajo de investigación es realizar la asociación de la vulnerabilidad de la población a un evento de contaminación de las aguas subterráneas, razón por la cual solo se abordan los aspectos que son considerados específicos y directamente relacionados al tema.

En la elaboración del marco conceptual, finalmente se plantean los componentes, variables y criterios que permitirán calificar la vulnerabilidad humana a un peligro de contaminación del agua subterránea (Tabla 2-8).

Para este punto se retoma de nuevo lo expuesto por la Universidad Nacional (IDEA, 2005), y se plantea la vulnerabilidad humana como el resultado de sumar la exposición con los elementos de respuesta; la fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia, dando a cada componente un peso (Función 2.6).

Función 2.6. $$IVH = a * Exposición + b * Fragilidad + c * Resiliencia$$

Donde,
IVH= Índice de vulnerabilidad humana,
Exposición, fragilidad y falta de resiliencia, los componentes de la vulnerabilidad,
a, b y c, son los pesos relativos de cada componente.

Componente	Variable	Criterio	Unidad
Exposición	Densidad poblacional	Total de personas asentadas en el área de estudio y que dependen del recurso hídrico subterráneo, sobre el área de unidad de análisis espacial.	Hab/km^2
Fragilidad Socioeconómica	Cobertura en Acueducto	Cantidad de personas sin acueducto, sobre cantidad total de personas	Porcentaje sin acueducto
	Nivel educativo	Cantidad de personas mayores de 11 años con ninguna educación o primaria incompleta, sobre el número total de personas mayores de 11 años.	Porcentaje con estudios inferior a la primaria.
	Nivel de ingresos	Cantidad de jefes de hogar que reciben un salario por debajo del salario mínimo mensual vigente para el año de análisis, sobre el número total de jefes de hogar	Porcentaje de jefes de hogar con salario inferior al mínimo
	Cobertura en Salud	Cantidad de personas sin afiliación para acceder a servicio de salud, sobre el número total de personas.	Porcentaje de personas sin cobertura en salud
	Cultural	Según la importancia que le den al agua, estimada mediante la presencia de personas pertenecientes a etnias y a la cultura de protección, valoración y uso del agua	Valor de 0 a 1
Falta de Resiliencia	Programas de saneamiento	De acuerdo con la existencia de PD, POT o EOT, POMCA; PORH; PGIRS, PMAS, PMAA; PSMV	Valor de 0 a 1
	Programa de educación ambiental	Existencia de programas de educación ambiental proyectados y/o realizados.	Valor de 0 a 1
	Programas de prevención y atención de emergencias, relacionadas con el consumo de agua	Existencia de P.P.A.E, proyectado, con comité conformado, capacitado y/o socializado en la comunidad	Valor de 0 a 1
	Fuentes alternas de abastecimiento	Existencia de fuente alterna, alguna proyectada, construida, operada y/o administrada.	Valor de 0 a 1
	Organizaciones sociales	Existencia de Organizaciones sociales, mujeres, jóvenes, adultos, J.A.C consolidada y/o administradora del servicio de acueducto	Valor de 0 a 1

Tabla 2-8 Componentes, variables, criterios y unidad de medida en la vulnerabilidad humana

2.3. El riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas

Con respecto a la evaluación del riesgo frente a eventos de contaminación del agua subterránea son pocas las investigaciones que se tienen en la actualidad. Los más destacados se realizaron en América Latina y Europa y se presentan a continuación, haciendo referencia al marco conceptual para la aplicación metodológica.

La mayoría de las publicaciones relacionadas con el tema de agua subterránea, hablan del "riesgo" a la contaminación. Desde 1988 cuando Foster e Hirata, presentan la metodología para determinar el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, los demás investigadores siguen manejando la misma terminología, razón por la cual la mayoría de los títulos de las investigaciones incluyen la palabra riesgo, pero técnicamente se evaluaba el peligro a la contaminación. Es entonces en 2002, cuando se genera una aclaración y diferenciación entre los términos peligro y riesgo, definiendo éste último como el resultado del peligro adaptado a la escala del impacto sobre la población y/o ecosistemas acuáticos que dependen del acuífero (Foster *et al*, 2002).

Es importante hacer mención especial sobre la necesidad de incorporar en los análisis de riesgos el valor económico de los recursos hídricos subterráneos y la relación que puede tener su contaminación con el tratamiento de las enfermedades, las pérdidas en los días laborales, disminución en la producción de cierto producto y en los costos de contar con fuentes alternas de abastecimiento, el tratamiento y recuperación del mismo. Esto va en la misma dirección de lo planteado por Nguyet y Goldsheider (2006), quienes consideran que la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas debe tener en cuenta tres aspectos: la amenaza, la vulnerabilidad y la importancia o el costo del recurso.

Darmendrail (2003) presenta una herramienta que permite realizar un análisis simplificado del riesgo basado en tres aspectos: a) la presencia de una fuente de peligro, b) un modo de transferencia y c) un receptor objetivo, la ausencia de algunos de los tres aspectos indica que una evaluación del riesgo no es pertinente. Igualmente plantea la importancia del recurso hídrico para una comunidad, y establece tres clases de usos del agua; 1) aquellos que la utilizan para uso doméstico, 2) aquellos que la utilizan para otras actividades y no es considerado como un recurso para abastecimiento doméstico de las futuras generaciones y 3) aquellos que no utilizan el recurso, pero lo consideran como reserva para las futuras generaciones.

En el año 2005, Peluso *et al* presentan la terminología de riesgo sanitario, referida a eventos de contaminación del agua subterránea y a la exposición de la población debido al consumo de ésta, todo enfocado a la gestión de los recursos hídricos. Esta investigación recoge lo expuesto por Darmendrail (2003) y adiciona nuevos elementos en el paradigma de los Análisis de Riesgo Sanitario (ARS): la identificación de la fuente de riesgo, la cuantificación de la exposición a la misma por un individuo, la estimación de la dosis de exposición y la respuesta toxicológica a la misma, y la caracterización final del riesgo (NRC, 1983). El riesgo es una función de la toxicidad de la sustancia peligrosa y la magnitud de la exposición a la misma (USEPA, 1992), existiendo diferentes modelos para estimar esta última (Fryer *et al*., 2006).

Los análisis de riesgo son herramientas metodológicas que ayudan a los tomadores de decisiones a sustentar elecciones racionales e informadas entre acciones alternativas vinculadas al manejo del agua (GWP, 2000). Específicamente, el análisis

de riesgo sanitario estima el nivel potencial de peligro para un receptor humano o ecológico a partir del contacto con una sustancia química presente en el ambiente. Este instrumento permite la caracterización de los efectos adversos potenciales y su probabilidad de ocurrencia, lo que permite identificar, evaluar, seleccionar e implementar acciones para reducirlos.

Massone *et al* (2005) clasifica los riesgos de acuerdo con su origen y en relación con la contaminación de acuíferos se hablaría de un riesgo geológico inducido. Massone y Martínez (2008) exponen que el concepto del riesgo tiene varios significados, según el campo en que sea empleado: economía, epidemiología o el de los riesgos naturales. En todos los campos existe un común denominador que es considerar la probabilidad de ocurrencia de un evento, su magnitud y frecuencia y el daño que este puede producir. Plantean que es posible definir una proporcionalidad directa entre estos tres factores: riesgo, peligrosidad y daño potencial. En riesgos vinculados a procesos naturales es común considerar la vulnerabilidad de la población expuesta al mismo como indicador de magnitud del daño, con lo cual el riesgo estará definido por dos variables; peligrosidad del evento y vulnerabilidad de la población expuesta al mismo.

Massone y Sagua (2005) en el proceso de evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos, consideran que la amenaza está compuesta por la vulnerabilidad del acuífero y la carga contaminante real o potencial, y plantean para escalar al riesgo, considerar la vulnerabilidad de la población expuesta a esa amenaza. Puede establecerse por lo tanto que el riesgo está en función de; la vulnerabilidad del acuífero, la carga contaminante y la vulnerabilidad de la población expuesta. (Función 2.7).

Función 2.7. $$Rca = f\left[(V_a, CC), V_{ep}\right]$$

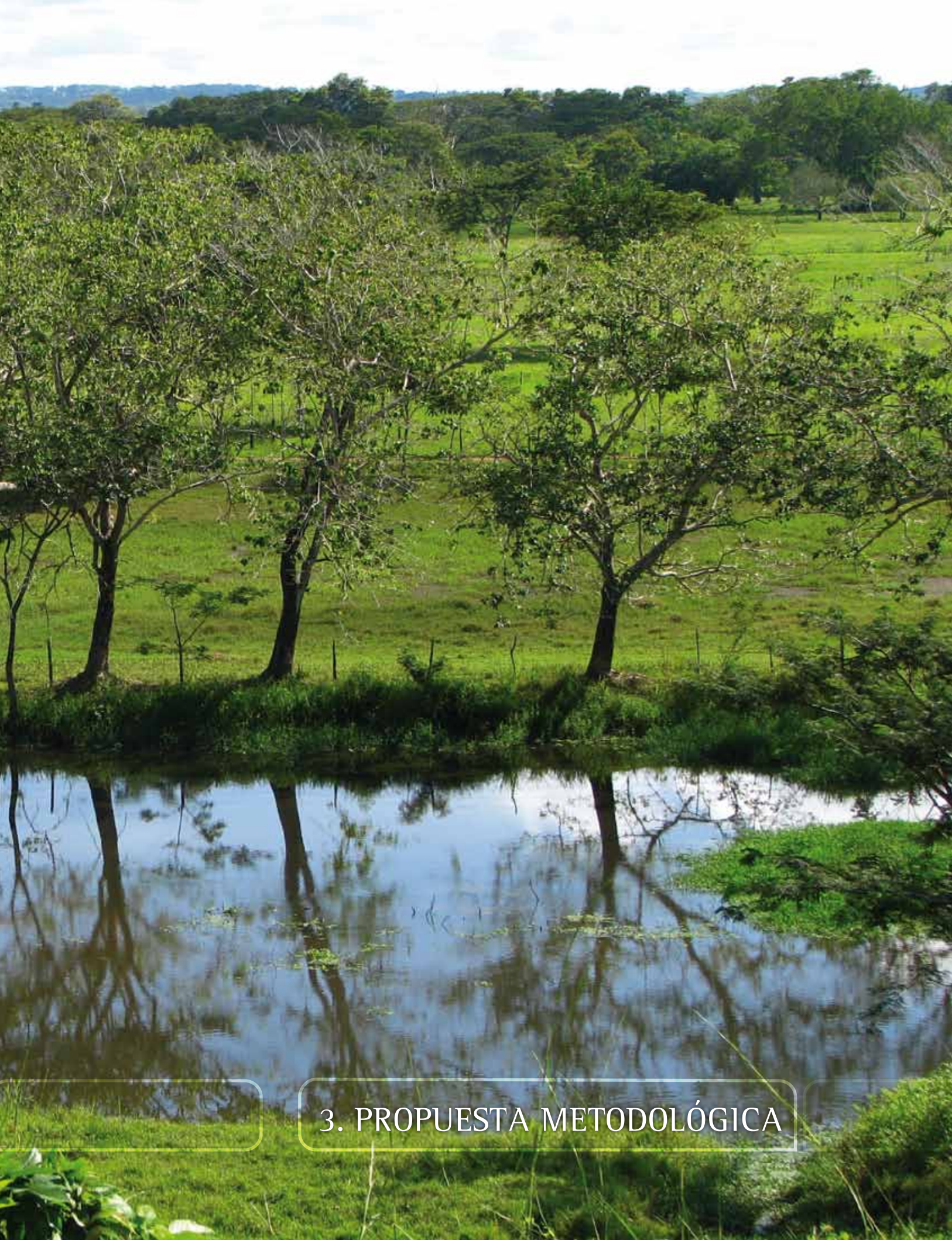
Donde,
Rca, es el riesgo a la contaminación de acuíferos,
(Va, CC), es el peligro a la contaminación, compuesto por la Vulnerabilidad del medio acuífero y la carga contaminante asociada.
Vep, es la vulnerabilidad de la población expuesta.

Uno de los trabajos que orientó la metodología planteada y que presenta un derrotero metodológico específico para la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, es el adelantado por Vías (2005), "Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España". En este proyecto se destaca el diseño de una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad del medio humano, como resultado de variables de exposición y resistencia de los elemento en riesgo. Además de la población y de las actividades económicas dependientes del agua subterránea, el recurso hídrico subterráneo es considerado también un elemento en exposición y es valorado de acuerdo con su importancia comparando el volumen de agua en un año húmedo entre sistemas acuíferos. El riesgo a la contaminación de acuíferos es clasificado en cinco clases correspondientes a los intervalos de los índices obtenidos mediante el producto de los límites establecidos para cada componente del riesgo; muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

Ducci *et al* (2008) realizan un ejercicio de evaluación del riesgo a la contaminación siguiendo cinco pasos: 1) determinación del mapa de contaminación potencial por nitratos, el cual es obtenido de acuerdo al rango de densidad poblacional de las zonas de estudio, usos del suelo, área urbano y rural y la cobertura del sistema de

alcantarillado, 2) determinación del mapa de vulnerabilidad del acuífero, 3) determinación del mapa de valor socioeconómico, según el uso del suelo encima del acuífero, 4) obtener el mapa de peligro de contaminación por nitrato de acuerdo con la interacción que se presenta entre el paso número 1 Mapa de contaminación potencial y 2 mapa de vulnerabilidad del acuífero y 5) obtener el mapa de riesgo a partir de la interacción entre el paso 3, mapa de valor socio-económico del sistema acuífero y el paso 4, mapa de peligro de contaminación. Para la clasificación del riesgo se plantean cinco clases: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

Para concluir este capítulo de marco conceptual se expone que el riesgo de contaminación en el presente proyecto de investigación será obtenido mediante la interacción del peligro de contaminación y la vulnerabilidad humana al mismo.



3. PROPUESTA METODOLÓGICA

> Las clases de exposición se obtuvieron según los rangos obtenidos mediante la densidad poblacional por vivienda promedio y validados con la densidad poblacional máxima que puede ser abastecida por el sistema acuífero.

3. PROPUESTA METODOLÓGICA

En este capítulo se presenta una propuesta metodológica para la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, acoplando propuestas existentes y en algunos casos muy difundidas para la evaluación de algunos componentes del riesgo -como la vulnerabilidad intrínseca, la carga contaminante y el peligro- con elementos recientemente elaborados como es la determinación de la vulnerabilidad humana asociada a un evento de contaminación del recurso hídrico subterráneo.

En primera instancia se presenta un planteamiento metodológico del trabajo de investigación, teniendo en cuenta que las variables involucradas en la determinación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas son el peligro y la vulnerabilidad humana, luego se presentan los materiales utilizados para el logro de los objetivos.

3.1. Metodología

Si bien en la literatura se encuentran algunas referencias en torno al tema del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, tal y como se estableció en el capítulo 2 de este informe, el riesgo constituye un concepto cuyo significado ha variado a través del tiempo; a la luz de una síntesis en torno a él se propone aquí un procedimiento para su evaluación (Figura 3-1) que pueda ser aplicado a cualquier acuífero libre dispuesto en un dominio espacial donde el uso del suelo sea principalmente rural.

La propuesta recoge los avances de la Universidad de Antioquia en ejecución de proyectos de investigación desde el 2005 y culmina con la incorporación de los elementos elaborados durante las jornadas de discusión y capacitación realizadas en agosto 2009, en el proyecto “Estrategias de gestión del riesgo de contaminación de acuíferos freáticos en áreas peri-urbanas y rurales. Aplicabilidad, análisis, potencialidades y restricciones en dos países de América Latina”, que adelantan la Universidad de Antioquia – Colombia y la Universidad Nacional del Mar del Plata – Argentina, según convenio suscrito dentro del Programa de Cooperación Científico-Tecnológico entre el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina (MINCYT) y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS).

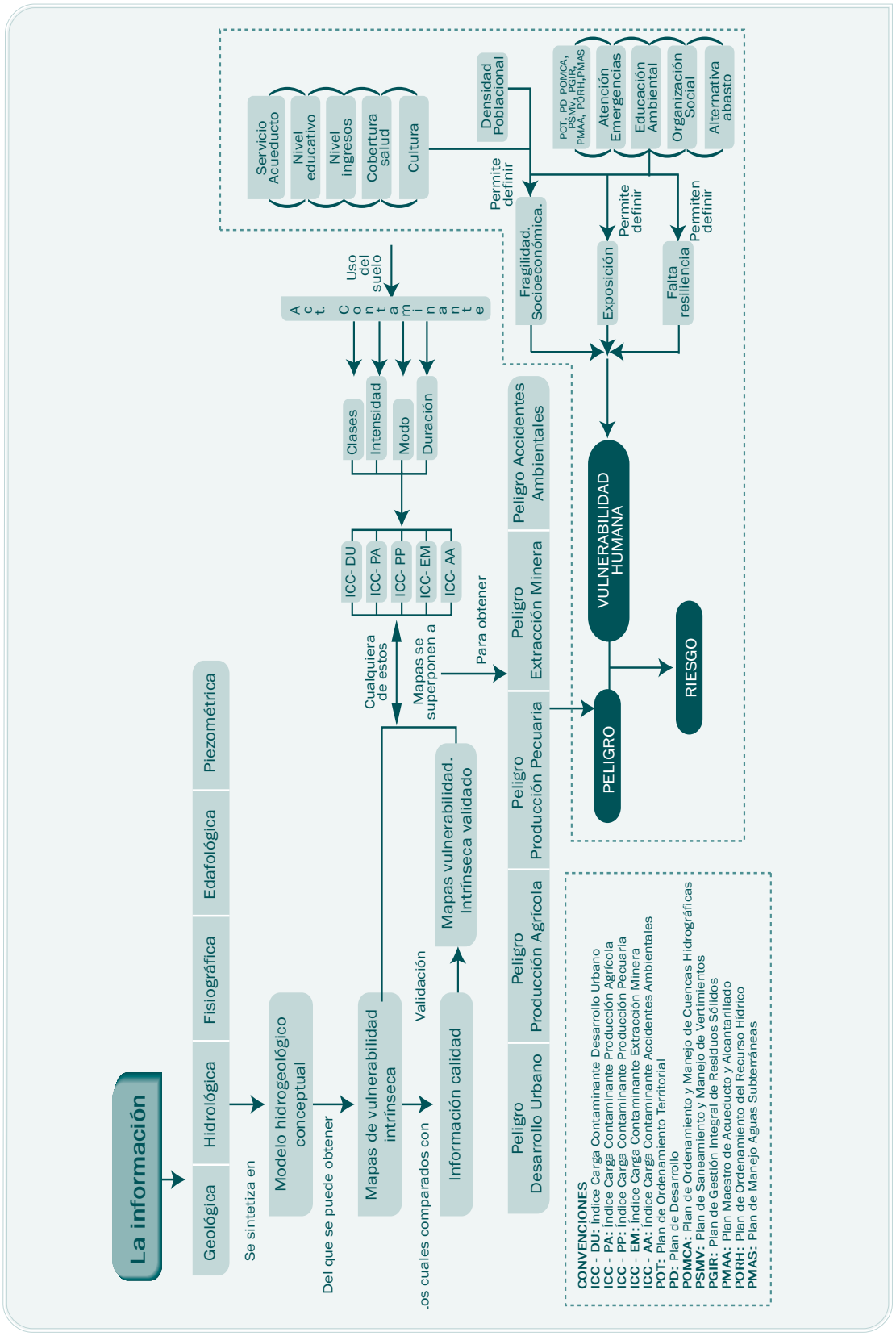


Figura 3-1 Esquema metodológico para la evaluación del riesgo a la contaminación y sus componentes

Como se presenta en el esquema metodológico, para emprender un proyecto cuyo objetivo sea la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, se debe a partir de la información disponible acerca de las características geológicas, hidrológicas, fisiográficas, edafológicas y piezométricas del medio acuífero, y producto de la exploración hidrogeológica básica, tener la posibilidad de proponer el modelo hidrogeológico conceptual, es decir, la identificación y descripción de los componentes y procesos presentes en el sistema.

La información consignada en el modelo hidrogeológico permite evaluar mediante varios procedimientos la vulnerabilidad intrínseca, y el conocimiento de las condiciones de calidad del agua subterránea posibilita la validación de un método para contar con un resultado de la vulnerabilidad.

El conocimiento de los usos del suelo y de las principales actividades económicas que lleva a cabo la población proporcionan los elementos para evaluar la posible o efectiva carga contaminante que puede amenazar la calidad del agua almacenada en el subsuelo.

De la relación entre vulnerabilidad intrínseca y carga contaminante se obtiene el peligro de contaminación de las aguas subterráneas. Ya alcanzada la evaluación del grado del peligro a la contaminación, es prioritario trascender a la determinación del riesgo, para lo cual se requiere un análisis de la susceptibilidad de la población a ser adversamente afectada por un evento de contaminación de las aguas subterráneas. Para esto, se incorpora en la metodología el determinar la vulnerabilidad humana, a partir de una serie de variables: exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia de la población.

Bajo este esquema y con el fin de describir la propuesta metodológica, se expone a continuación la forma de abordar cada componente del riesgo, haciendo énfasis en la vulnerabilidad humana, elemento éste con interpretaciones y aportes nuevos construidos dentro de esta investigación.

3.1.1. Determinación del peligro a la contaminación y sus componentes

3.1.1.1. Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca

Entre los métodos de superposición propuestos para la evaluación de la vulnerabilidad, los más conocidos son los métodos intrínsecos entre los cuales se destacan; EPNNA, DRASTIC, SINTACS, GOD, AVI y EKv y los métodos específicos más usados son: DRASTIC-PESTICID, GODS, IPN IFN, IS, SEA-Gindex, and SEA-Dindex. Algunos de los métodos mencionados se pueden aplicar en cualquier sistema acuífero, otros son exclusivos para sistemas kársticos, sistemas costeros, medios porosos o para acuíferos en medios fracturaros. Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad presentan los resultados por clases; Foster *et al* (2002) proponen, con el objetivo de superar el uso indiscriminado de índices para evaluar la vulnerabilidad, definir 5 clases de vulnerabilidad; extrema, alta, moderada, baja y despreciable (Muy baja). (Tabla 3-1).

Clase	Definición
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Baja	Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
Despreciable	Presencia de capas confinantes en la que el flujo vertical (precolación) es insignificante.

Tabla 3-1 Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero
Tomado de Foster *et al*, 2002

La aplicación de varios métodos para la evaluación de la vulnerabilidad, la comparación entre ellos y la validación según condiciones de calidad del agua subterránea, constituye un procedimiento apropiado para obtener la representación de la vulnerabilidad más adecuada a las condiciones de un sistema acuífero particular. Según la naturaleza del acuífero en consideración, conocida ella a partir del modelo hidrogeológico conceptual, se pueden identificar los procedimientos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca que podrían aplicarse para su estudio, las diferentes escalas de valoración de la vulnerabilidad pueden reclasificarse y normalizarse para hacer comparativos entre los diferentes métodos aplicados, posteriormente a partir de una caracterización de las condiciones de calidad del agua subterránea se puede validar el método de evaluación de la vulnerabilidad que mejor se ajuste al acuífero que esta siendo objeto de estudio, una descripción detallada de este procedimiento se encuentra en Rueda y Betancur (2005).

3.1.1.2. Evaluación de la carga contaminante

Foster *et al* (2002) presentan una agrupación de las principales fuentes potenciales de contaminación a las aguas subterráneas. Los tipos de actividad principales son: desarrollo urbano, producción industrial, producción agrícola y pecuaria y extracción minera. Cada una de estas actividades tiene descrito la categoría de distribución la cual puede ser, urbana, rural o urbana-rural y además especifica como puede presentarse, lineal, puntual o difusa. Adicionalmente presentan una relación entre las fuentes potenciales de contaminación y los principales tipo de contaminantes asociados a cada una de ellas, indicando cuando puede aumentar la importancia, en caso de presentarse una sobrecarga hidráulica o la aplicación debajo de la capa de suelo.

Interpretando las propuestas de Foster, *et al* (2002), Gaviria y Betancur (2005 y 2006) propusieron un derrotero metodológico para obtener el índice de carga contaminante (ICC) el cual es adoptado en este trabajo.

El derrotero metodológico comienza con un inventario de fuentes potenciales de contaminación, el cual según Zaporozec (2001) está compuesto por tres fases: 1) diseño del inventario, el cual incluye la identificación de las fuentes de información, el presupuesto requerido y disponible, el nivel del personal técnico y el método de encuesta, 2) implementación del inventario, donde se logra la organización del censo, la preparación de los formatos y el proceso de obtención de la información y 3) evaluación y síntesis, que comprende el análisis de los datos recopilados, la verificación y

consistencia de la información, la clasificación de las actividades y la construcción de la base de datos. Este inventario comprende la identificación, localización espacial y la caracterización de todas las fuentes, obteniendo la información histórica del punto que sirva de base para evaluar cuales actividades tienen mayor potencial de generación de carga contaminante.

El inventario es seguido por una clasificación según el tipo de actividad relacionada, la cual a su vez es asociada con un tipo de contaminante específico con la finalidad de poder obtener los valores relativos que varían de 0 a 1, según las cuatro características fundamentales y semi-independientes; la clase, la intensidad, el modo de disposición y la duración (Foster *et al*, 2002).

Finalmente se asigna un factor de importancia a cada una de las características mencionadas y se usa una función que las integra para obtener los índices de carga contaminante tal y como lo proponen Rueda y Ángel (2004), presentado en el numeral 2.1.2.

3.1.1.3. Evaluación del peligro a la contaminación

Como se mencionó en el capítulo 2 a partir de Foster *et al*. (2002) se plantea la evaluación del peligro de acuerdo con la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del medio acuífero, superponiendo los resultados del inventario y caracterización de la carga contaminante con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. La matriz de Nguyet y Goldscheider (2006), adaptada por Betancur (2008) (Tabla 3-2) facilita la representación mediante mapas del peligro utilizando herramientas de sistemas de información geográfica.

En este estudio se propone realizar un análisis de densidad de actividades potencialmente contaminantes inventariadas para cada unidad de análisis establecida.

Amenaza	Vulnerabilidad				
	Extrema	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Alta	Extremo	Alto	Alto	Moderado	Bajo
Moderada	Alto	Alto	Moderado	Bajo	Muy Bajo
Baja	Alto	Moderado	Bajo	Bajo	Muy Bajo

Tabla 3-2 Matriz de peligro, interacción entre vulnerabilidad intrínseca del acuífero y la carga contaminante
Tomado de Betancur, 2008

3.1.2. Determinación de la vulnerabilidad humana y sus componentes

Por considerarse un aporte nuevo del proyecto de investigación, este numeral hace énfasis en el procedimiento propuesto para la evaluación de la vulnerabilidad humana ante un evento de contaminación de las aguas subterráneas.

En primer lugar se parte de Foster *et al,* (2002) quienes proponen adecuar la terminología debido a las definiciones utilizadas en las áreas de la evaluación del riesgo a la salud humana, considerando el riesgo como el impacto del peligro sobre la población y adoptando desde otras disciplinas la definición del riesgo como función de la amenaza y la vulnerabilidad; se introduce y desarrolla la idea de vulnerabilidad humana.

Mediante la revisión exhaustiva de las investigaciones sobre la sensibilidad de la población a ser afectada ante un evento que conlleve peligro, se encontró que hay varias metodologías, en su mayoría enfocadas a los acontecimientos naturales como terremotos e inundaciones. En el tema específico del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas también se encontraron algunos planteamientos metodológicos que requieren de ciertas variables consideradas como de exposición y respuesta. Con esta información se construyeron cuadros comparativos partiendo de la vulnerabilidad global (Wilches Chaux, 1993) con las variables consideradas por varios investigadores a nivel nacional e internacional, en las temáticas de normatividad, sistemas de indicadores de desarrollo, desastres naturales y recurso hídrico, de acuerdo con la disponibilidad de la información y la representatividad de la misma.

Como se propuso en la discusión final que cierra el capítulo de marco teórico y estado del arte, la vulnerabilidad humana se evaluará a partir de tres variables principales: exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia, clasificadas en cinco clases, las cuales pueden tomar valores desde 0,2 a 1,0, considerándose 0,2 una clase muy baja, 0,4 baja, 0,6 moderada, 0,8 alta y 1,0 extrema. Esta propuesta metodológica se realiza con el fin de facilitar la asignación de cinco clases a cada una de las componentes de la vulnerabilidad humana, que sean manejables matemáticamente y que permita la posterior combinación entre variables para definir las clases de vulnerabilidad humana presentes en la zona (Anexo B), y su interacción con el peligro a la contaminación de las aguas subterráneas para evaluar el riesgo. El significado de estos tres componentes de la vulnerabilidad humana, la forma de evaluarlos y como relacionarlos en una función se presentan a continuación:

3.1.2.1. Evaluación de la exposición

La metodología propuesta para evaluar la exposición de la población, se relaciona directamente con los valores normativos establecidos para las densidades poblacionales máximas que pueden darse en suelos suburbanos, rurales, de protección o de parcelación para vivienda campestre. Los rangos utilizados para clasificar los diferentes tipos de exposición son validados con la densidad poblacional máxima que puede ser abastecida por el sistema acuífero ubicado en la zona de estudio, bajo las consideraciones de precipitación, recarga potencial y dotación de agua.

Como variable de la exposición se considera la variabilidad espacial de la densidad poblacional expresada en habitantes por kilómetro cuadrado y obtenida a partir de la información reportada en los censos realizados a nivel local y nacional.

Las clases de exposición definidas en el presente estudio se obtuvieron según los rangos obtenidos mediante la densidad poblacional por vivienda promedio y validados con la densidad poblacional máxima que puede ser abastecida por el sistema acuífero. En la Tabla 3-3 se presentan los rangos de densidad poblacional, la clasificación y el valor relativo.

EXPOSICIÓN		
RANGO (Hab/Km^2)	CLASE	VALOR
>1200	EXTREMA	1
500-1200	ALTA	0,8
50-500	MODERADA	0,6
10-50	BAJA	0,4
<10	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-3 Rangos de densidad poblacional, clase y valor relativo para la exposición

3.1.2.2. Evaluación de la fragilidad socio-económica

Con relación a la fragilidad socioeconómica, se consideraron cinco variables que permiten estimar qué tan preparada está una comunidad para responder ante un evento de contaminación, ellas son: a) cobertura en el servicio de acueducto, b) nivel educativo, c) nivel de ingresos, d) cobertura en atención en salud y e) cultura ancestral. Cada variable es analizada y clasificada de acuerdo con los extremos críticos, es decir ante aquellas situaciones que agravarían o que no permitirían una respuesta adecuada a un evento de contaminación de las aguas subterráneas. Finalmente se propone una función que interrelacione cada variable y permita obtener un valor para este componente. A continuación se presentan las consideraciones y las clases establecidas para las variables de la fragilidad socioeconómica.

a) Cobertura en el servicio de acueducto: Esta variable es obtenida a partir de la información reportada en las bases de datos oficiales e institucionales y se considera que aquellas unidades espaciales de análisis, donde la cobertura no alcanza el 20 % de la totalidad de las viviendas ubicadas en ella, la clase es extrema y se obtiene el máximo valor relativo, 1. Así mismo se establecen las demás clases y valores disminuyendo a medida que la cobertura del servicio de acueducto va aumentando (Tabla 3-4).

SIN COBERTURA DE ACUEDUCTO		
RANGO (%)	**CLASE**	**VALOR**
>80	EXTREMA	1
60-80	ALTA	0,8
40-60	MODERADA	0,6
20-40	BAJA	0,4
0-20	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-4 Rangos sin cobertura de acueducto, clase y valor relativo

b) Nivel educativo: Para la medición de esta variable se considera aquella población que de acuerdo con la edad ya debería haber completado los estudios de primaria, es decir hasta quinto año. En aquellas unidades espaciales de análisis donde más del 60% de la población de análisis (todos aquellos mayores de 11 años) no tuviera ningún nivel de ecuación formal o tuviera la primaria incompleta se estableció una clase extrema y se obtiene el máximo valor relativo, 1. Las demás clases y valores se asignan en forma descendente, hasta obtener una clase muy baja y un valor relativo de 0,2 para aquellas zonas donde más del 90% de la población mayor de 11 años ha terminado los estudios de primaria (Tabla 3-5).

SIN EDUCACION O CON PRIMARIA INCOMPLETA		
RANGO (%)	**CLASE**	**VALOR**
>60	EXTREMA	1
60-40	ALTA	0,8
40-20	MODERADA	0,6
20-10	BAJA	0,4
<10	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-5 Rangos sin educación o incompleta, clase y valor relativo

c) Nivel de ingresos: El nivel de ingresos es obtenido para los jefes de hogar, bajo la consideración del salario mínimo mensual legal vigente, es decir, las unidades espaciales de análisis donde más del 80% de los jefes de hogar devenguen menos de un salario mínimo al mes, se establece la clase extrema y se asigna el máximo valor relativo, 1. Las demás clases y valores se asignan en forma descendente, hasta obtener una clase muy baja y un valor relativo de 0,2 para aquellas zonas donde más del 80% de los jefes de hogar perciban un ingreso mensual igual o mayor al SMMLV (Tabla 3-6).

NIVEL DE INGRESOS EN EL JEFE DE HOGAR POR DEBAJO DEL SMLV		
RANGO (%)	**CLASE**	**VALOR**
>80	EXTREMA	1
80-60	ALTA	0,8
60-40	MODERADA	0,6
40-20	BAJA	0,4
<20	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-6 Rangos nivel de ingresos, clase y valor relativo

d) Cobertura en atención en salud: Esta variable es evaluada como el porcentaje de personas que no cuentan con afiliación o cobertura en salud. A las unidades de análisis espaciales que tengan una población mayor al 80% sin afiliación o cobertura en salud, le corresponde la clase extrema y se obtiene el máximo valor relativo, 1. Las demás clases y valores se asignan en forma descendente (Tabla 3-7), hasta obtener una clase muy baja y un valor relativo de 0,2 para aquellas zonas donde menos del 20% de la población, no cuente con afiliación o cobertura en salud.

SIN AFILIACIÓN O COBERTURA EN SALUD		
RANGO (%)	**CLASE**	**VALOR**
>80	EXTREMA	1
80-60	ALTA	0,8
60-40	MODERADA	0,6
40-20	BAJA	0,4
<20	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-7 Rangos sin afiliación o cobertura en salud, clase y valor relativo

e) Cultura ancestral: Esta variable es evaluada según la influencia ancestral que se tenga en la unidad espacial de análisis, relacionada con la importancia y el valor que se da al agua y esta dada por las consideraciones establecidas en la Tabla 3-8. Aquellas unidades que tengan una cultura de protección, valoración y uso adecuado del agua, tiene una clase muy baja y el menor valor relativo, 0.2. Las demás clases y valores se asignan en forma ascendente, hasta obtener una clase extrema y un valor relativo de 1, para aquellas zonas donde se considere que la población no da importancia al agua. Hay unas clases intermedias que varían según la presencia o no de personas pertenecientes a etnias.

CULTURA ANCESTRAL		
CONSIDERACIÓN	**CLASE**	**VALOR**
No dan importancia al agua.	EXTREMA	1
No hay presencia de personas pertenecientes a etnias	ALTA	0,8
Presencia de algunas personas pertenecientes a etnias	MODERADA	0,6
Conservación ancestral sobre importancia del agua	BAJA	0,4
Cultura de protección, valoración y uso del recurso	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-8 Consideraciones de la cultura ancestral, clase y valor relativo

Finalmente, la fragilidad socioeconómica es el resultado de las sumatoria de los valores obtenidos para cada variable dividido entre el número de variables consideradas, es decir, se tiene para este nivel un coeficiente de importancia igual para cada variable, el cual puede ser modificado y adecuado según los planteamientos y consideraciones realizadas en cada estudio (Función 3.1).

Función 3.1. $$FSE = \frac{\left(VR_{Acueducto} + VR_{Educación} + VR_{Ingresos} + VR_{Salud} + VR_{Cultura}\right)}{5}$$

El mayor valor que se puede obtener para la fragilidad socioeconómica es de 1, el cual indica una mayor fragilidad socioeconómica de la población ante un evento de contaminación de las aguas subterráneas y el menor valor es de 0,2 (Tabla 3-9).

FRAGILIDAD SOCIOECONÓMICA	
CLASE	**VALOR**
EXTREMA	> 0,8
ALTA	0,8 - 0,6
MODERADA	0,6 – 0,4
BAJA	0,4 – 0,2
MUYBAJA	0,2

Tabla 3-9 Clasificación de la fragilidad socioeconómica

3.1.2.3. Evaluación de la falta de resiliencia

Para la evaluación de la falta de resiliencia se plantearon cinco variables, ellas son: a) existencia de planes relacionados con el gobierno en materia de ordenamiento territorial, saneamiento básico y manejo de cuencas, b) programas de educación ambiental, c) programas de prevención y atención de emergencias relacionadas con la contaminación del agua, d) existencia de fuentes alternas de abastecimiento y e) existencia de organizaciones sociales. Se propone una metodología que permita evaluar la falta de acciones que se deben promover, fortalecer o priorizar para lograr un mayor nivel de seguridad. Igualmente se propone una función que integre las cinco variables y permita obtener un valor y una clasificación para esta componente. A continuación se presentan las consideraciones y las clases establecidas para las variables de la falta de resiliencia.

a) Programas de ordenamiento territorial y saneamiento: Esta variable es medida con la existencia de los programas de gobierno como el plan de desarrollo (PD), plan o esquema de ordenamiento territorial (POT/EOT), plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS), plan maestro de acueducto y alcantarillado (PMAA), plan de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV), plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), plan de ordenación del recurso hídrico (PORH) y plan de manejo de aguas subterráneas (PMAS). La clase extrema se presenta en aquellas zonas donde no existe ningún plan y se asigna el mayor valor relativo, 1. En caso contrario donde se da el complemento de todos los planes, es decir existe desde el PD y el POT/EOT hasta el PORH y/o PMAS, se obtiene una clase muy baja con un valor relativo de 0,2. (Tabla 3-10).

PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y SANEAMIENTO			
ID	CONSIDERACIÓN	CLASE	VALOR
1	Ningún plan	EXTREMA	1
2	PD+POT/EOT	ALTA	0,8
3	(2)+PGIRS+PMAA	MODERADA	0,6
4	(3)+PSMV+POMCA	BAJA	0,4
5	(4)+PORH+PMAS	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-10 Consideraciones de ordenamiento y saneamiento, clase y valor relativo

b) Programas de educación ambiental: Esta variable es evaluada mediante su existencia en la planeación del gobierno local, es decir aquellas zonas donde no existan programas de educación ambiental se establecen como clase extrema y se obtiene el mayor valor relativo, 1. En aquellas zonas donde al menos exista un programa proyectado, es clase alta (0,8), al menos tres proyectados, es clase moderada (0,6), y aquellas donde se presentan tres o más programas de educación ambiental ya realizados, serán clase baja (0,4) y muy baja (0,2) respectivamente (Tabla 3-11).

PROGRAMAS DE EDUCACIÓN AMBIENTAL		
CONSIDERACIÓN	CLASE	VALOR
Ninguno	EXTREMA	1
1 en el gobierno, proyectado	ALTA	0,8
3 en el gobierno, proyectados	MODERADA	0,6
3 en el gobierno, realizados	BAJA	0,4
> 3 realizados	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-11 Consideraciones de educación ambiental, clase y valor relativo

c) Programas de prevención y atención de emergencias: Esta variable es evaluada mediante la existencia de programas de prevención y atención de emergencias relacionadas con la contaminación del agua subterránea que abastece determinada población. En esta evaluación también se considera el grado de avance de los programas, la conformación de los comités de prevención y atención, la capacitación de la población y la socialización del programa. Cuando no existe programa de prevención y atención de emergencias con el componente relacionado a un evento de contaminación de las aguas que abastecen la comunidad, se tiene la clase extrema y el mayor valor relativo, 1. Cuando el programa está proyectado, la clase es alta (0,8), si además de proyectado se tiene un comité de prevención y atención conformado, la clase es moderada (0,6), cuando lo anterior se complementa con la capacitación, la clase es baja (0,4) y cuando se está socializado con la comunidad, la clase es muy baja (0,2) (Tabla 3-12).

PROGRAMAS DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS			
ID	CONSIDERACIÓN	CLASE	VALOR
1	Ninguno	EXTREMA	1
2	Proyectado	ALTA	0,8
3	(2)+Comité conformado	MODERADA	0,6
4	(3)+Capacitado	BAJA	0,4
5	(4)+Socializado el programa	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-12 Consideraciones prevención y atención, clase y valor relativo

d) Existencia de fuentes alternas de abastecimiento: Para la variable de fuentes alternas de abastecimiento se considera como clase extrema aquellas zonas donde no se tiene ninguna fuente alterna, asignando el mayor valor relativo, 1. En aquellos sitios donde la fuente alterna se tenga proyectada, la clase es alta (0,8), donde se tenga construida, la clase es moderada (0,6), donde se opere según las circunstancias, la clase es baja (0,4) y donde sea administrada por algún ente u organización, la clase es muy baja (0,2) (Tabla 3-13).

FUENTES ALTERNAS DE ABASTECIMIENTO			
ID	CONSIDERACIÓN	CLASE	VALOR
1	Ninguna	EXTREMA	1
2	Proyectada	ALTA	0,8
3	(2)+Construida	MODERADA	0,6
4	(3)+Operada	BAJA	0,4
5	(4)+Administrada	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-13 Consideraciones fuentes alternas, clase y valor relativo

e) Organizaciones sociales: La variable de organizaciones sociales es evaluada según la presencia de las mismas en las unidades espaciales de análisis. Para aquellas unidades donde no exista alguna organización social, la clase es extrema y se asigna el mayor valor relativo, 1. Cuando se tiene alguna organización social proyectada para conformar, la clase es extrema (0,8), cuando existen organizaciones de mujeres, jóvenes, adultos u otras, la clase es moderada (0,6), la existencia de una junta de acción comunal consolidada, representa una clase baja (0,4) y la presencia de una junta administradora del servicio de acueducto, la clase es muy baja (0,2) (Tabla 3-14).

ID	CONSIDERACIÓN	CLASE	VALOR
1	Ninguna	EXTREMA	1
2	Proyectada	ALTA	0,8
3	Mujeres+Jóvenes+Adultos+ otras	MODERADA	0,6
4	JAC, consolidada	BAJA	0,4
5	Administradora Acueducto	MUYBAJA	0,2

Tabla 3-14 Consideraciones organizaciones sociales, clase y valor relativo

La falta de resiliencia es el resultado de la sumatoria de los valores obtenidos para cada variable dividido entre el número de variables consideradas, es decir, se tiene para éste nivel un coeficiente de importancia igual para cada variable, el cual puede ser modificado y adecuado según los planteamientos y consideraciones realizadas en cada estudio (Función 3.2).

$$FR = \frac{\left(VR_{Ordenamiento} + VR_{EducaciónAmb} + VR_{Prevención} + VR_{FuentesAlternas} + VR_{Organizaciones}\right)}{5}$$

Función 3.2.

El mayor valor que se puede obtener para la falta de resiliencia es de 1, el cual indica una mayor falta de acciones que promuevan, fortalezcan y prioricen el logro de un adecuado nivel de seguridad de la población ante un evento de contaminación de las aguas subterráneas y el menor valor es de 0,2 (Tabla 3-15).

FALTA DE RESILIENCIA	
CLASE	VALOR
EXTREMA	> 0,8
ALTA	0,8 - 0,6
MODERADA	0,6 – 0,4
BAJA	0,4 – 0,2
MUYBAJA	< 0,2

Tabla 3-15 Clasificación de la falta de resiliencia

3.1.2.4. Evaluación de la vulnerabilidad humana

Para la evaluación de la vulnerabilidad humana, se planteó un ejercicio de ponderación de los componentes exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia con expertos e investigadores en el tema ambiental, mediante un Proceso Analítico Jerárquico (PAJ). El ejercicio de análisis jerárquico consiste en una comparación de atributos entre un par de factores, señalando la preferencia y la magnitud en diferencia.

Con los coeficientes de importancia definidos, se integran los valores obtenidos para cada componente mediante una función matemática, que permita a su vez clasificar la vulnerabilidad humana.

El resultado del trabajo en grupo se sometió a un análisis de las consideraciones realizadas por cada uno de los colaboradores (16) y adicionalmente se aplicó el método para evaluar el nivel de consistencia (Saaty, 1989) de la información suministrada, con lo cual se obtuvieron 11 encuestas con nivel de consistencia y confiabilidad. A continuación se presentan los coeficientes de importancia logrados mediante las encuestas que presentaban consistencia y el promedio, obteniendo para el coeficiente de importancia del componente de exposición un valor de 0,45, el coeficiente de importancia para la fragilidad socioeconómica es de 0,33 y el de la falta de resiliencia es de 0,22. En la Tabla 3-16, se presentan los resultados obtenidos para las componentes exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia y se utiliza el promedio como los coeficientes de importancia en la función que permite aproximarse a obtener un valor numérico y una clasificación de la vulnerabilidad humana.

PERSONA	EXPOSICIÓN	F. SOCIOECONÓMICA	F. RESILIENCIA
1	0,44	0,11	0,44
2	0,19	0,66	0,16
3	0,82	0,09	0,09
4	0,45	0,45	0,09
5	0,76	0,12	0,12
6	0,63	0,17	0,19
7	0,46	0,48	0,06
8	0,25	0,50	0,25
9	0,14	0,14	0,71
10	0,11	0,70	0,19
11	0,74	0,20	0,07
Promedio	0,45	0,33	0,22

Tabla 3-16 Coeficientes de importancia obtenidos para las componentes de la vulnerabilidad humana

Finalmente la Función 3.3 es la planteada para evaluar la vulnerabilidad humana: Función 3.3.

$$VH = 0.45 * Exposición + 0.33 * Fragilidad.Socioeconómica + 0.22 * Falta.Resiliencia$$

Con la expresión definida y los datos sintetizados para cada unidad de análisis espacial, se pueden obtener los mapas de vulnerabilidad humana mediante la utilización de las herramientas de análisis espacial incorporadas en los software de los sistemas de información geográfica. Las clases de vulnerabilidad humana presentadas en la Tabla 3-17 fueron definidas mediante la ayuda de un análisis de rangos matemáticos, a partir de las posibles combinaciones que se pueden generar con los productos obtenidos entre las tres componentes y luego entre dos, estableciendo valores, medios, máximos y mínimos, y en base a ellos poder definir igualmente las clases intermedias.

VULNERABILIDAD HUMANA	
CLASE	VALOR
EXTREMA	> 0,8
ALTA	0,8 - 0,6
MODERADA	0,6 – 0,4
BAJA	0,4 – 0,2
MUYBAJA	< 0,2

Tabla 3-17 Clasificación del índice de vulnerabilidad humana

3.1.3. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas

Como el objetivo de la determinación del riesgo de contaminación es ubicar aquellas zonas donde se puedan generar los mayores impactos del peligro en la comunidad, se propone una metodología similar a la explicada para el peligro, que consiste en construir una matriz de interacción entre las componentes, vulnerabilidad humana y peligro. Las clases de riesgo presentadas fueron definidas mediante la ayuda de un análisis de rangos matemáticos, asignando valores relativos al peligro que varían de 0,2 a 1, para peligro muy bajo 0,2, bajo 0,4, moderado 0,6, alto 0,8 y extremo 1 y partir de las posibles combinaciones que se pueden generar con los valores relativos de la vulnerabilidad humana, estableciendo valores de rangos extremos, y en base a ellos poder definir igualmente las clases intermedias (Anexo C).

De esta manera y partiendo del supuesto de que el Peligro y la Vulnerabilidad humana tienen la misma importancia se plantea, para aquellas zonas que tengan vulnerabilidad humana de alta a extrema y zonas donde se presente el peligro de alto a extremo, el riesgo de contaminación será siempre calificado como el más crítico: extremo. Aquellas combinaciones de vulnerabilidad humana extrema o alta con peligro de contaminación moderado, indicará riesgo de contaminación alto, de igual manera el peligro alto o extremo con vulnerabilidad humana moderada permitirá obtener riesgo de contaminación alto. Las demás combinaciones entre peligro moderado y vulnerabilidad humana moderada, arrojarán riesgo de contaminación moderado, este calificativo también se obtiene entre combinaciones de vulnerabilidad humana baja, con peligros de contaminación que varíen desde extremo a moderado y peligro de contaminación bajo con vulnerabilidades humanas de extrema a moderada. El calificativo de

riesgo de contaminación bajo se da entre peligro de contaminación bajo y vulnerabilidad humana baja, de igual manera las combinaciones entre vulnerabilidades humanas altas a bajas con peligro de contaminación muy bajo y peligros de contaminación de altos a bajos con vulnerabilidad humana muy baja, permiten obtener el calificativo en mención. La única combinación que permite obtener un riesgo de contaminación muy bajo, es que se presente coincidencia en el mismo calificativo de muy bajo entre la vulnerabilidad humana y el peligro de contaminación (Tabla 3-18).

PELIGRO	VULNERABILIDAD HUMANA				
	Extrema	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Extremo	Extremo	Extremo	Alto	Moderado	Moderado
Alto	Extremo	Extremo	Alto	Moderado	Bajo
Moderado	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Bajo
Bajo	Moderado	Moderado	Moderado	Bajo	Bajo
Muy Bajo	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo	Muy Bajo

Tabla 3-18 Matriz de riesgo, interacción entre la vulnerabilidad humana y el peligro de contaminación

3.2. Materiales

En este numeral se describen los materiales utilizados para la aplicación en la zona de estudio, de la propuesta metodológica que permita evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas. Se considera en este caso, que los materiales constan de información y herramientas para el procesamiento. La información está relacionada con cada uno de los componentes del riesgo; las herramientas incluyen formatos de campo, programas de almacenamiento y síntesis estadística de la información (Excel) y de modelación y representación espacial (ArcGIS) (Quiroz *et al*, 2007).

3.2.1. Información para la determinación del peligro

Siguiendo la secuencia metodológica se describe la información con la cual se contó para la evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas del acuífero libre ubicado en la cuenca baja del río Man en el Bajo Cauca antioqueño.

3.2.1.1. El modelo hidrogeológico conceptual

Los criterios de modelación geoestadística propuestos por Mejía *et al* (2006) para el acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño fueron aplicados para la zona de estudio contando con las siguientes fuentes de información:

- Cartografía básica a escala 1:25000 producida por el IGAC y convertida a formato digital.
- Información hidrometeorológica de cuatro estaciones pluviométricas, una climatológica y una pluviográfica, IDEAM.
- Mapa de suelos del Departamento de Antioquia y mapa geomorfológico del Departamento de Antioquia. Universidad Nacional y Corantioquia, 2002.
- Visión Panzenú, (Neotropicos y Corantioquia, 2001). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Man, (Betancur y Corantioquia, 2003). Plan de manejo ambiental del humedal Cienaga Colombia en el municipio de Caucasia (Corporación Montañas y Corantioquia, 2004).

- Estudios de evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de los acuíferos realizados en la zona: Entre los municipios de Caucasia y Cáceres (2003) y al Norte del municipio de Caucasia (2004), realizados entre la Universidad de Antioquia y Corantioquia.
- Validación del modelo conceptual de los acuíferos en la Dirección Territorial Panzenú (Universidad de Antioquia y Corantioquia, 2006).
- Identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de isótopos estables del agua. Caso de estudio: Bajo Cauca Antioqueño (Palacio, 2007).

3.2.1.2. Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero

Se utilizan las bases cartográficas con los mapas temáticos producidos por Rueda (2005) en el estudio "Aplicación y análisis comparativo entre metodologías de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos y confrontación con parámetros de calidad del agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño" y ajustados por Betancur (2008) en el proyecto "Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: el Bajo Cauca Antioqueño". Según las conclusiones expresadas por Rueda y Betancur (2006), se determina que la metodología DRASTIC es la que mejor se ajusta a las condiciones del acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño. Adicionalmente como valor agregado del proyecto "Hydrochemical and isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño" realizado entre la Universidad de Antioquia, el Organismo Internacional de Energía Atómica y la comunidad de la zona, se viene operando y consolidando desde el año 2007 una red de monitoreo de los niveles freáticos en el área de estudio, lo cual permite tener valores actualizados para la construcción del mapa de superficie freática.

3.2.1.3. Índice de carga contaminante

Para la determinación del índice de carga contaminante y la representación se espacial se retomaron los siguientes trabajos:

- Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño, específicamente en las zonas al norte del municipio de Caucasia y en la cuenca del Río Caserí. Trabajo de grado Ingeniería Sanitaria. Medellín, Colombia, Universidad de Antioquia (Gaviria, J. I. 2005).
- Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca Antioqueño (Gaviria y Betancur, 2005 y 2006).
- Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: el Bajo Cauca Antioqueño (Betancur, 2008).

Estos trabajos tienen en cuenta la información recopilada durante la realización del inventario de fuentes potenciales de contaminación directamente en campo y el procesamiento de la información que permite la caracterización de la carga contaminante. Durante el desarrollo del presente proyecto se visitaron nuevamente algunos predios de la zona de estudio en el mes de Febrero de 2009, con el fin de actualizar la base de datos sobre los factores de contaminación (Anexo D), utilizando el formato propuesto por Gaviria (2005), el cual se presenta en el numeral de herramientas, en el presente capítulo.

3.2.1.4. Peligro de contaminación

La información utilizada para la determinación del peligro corresponde a los resultados obtenidos para la vulnerabilidad del medio acuífero y la determinación de la carga contaminante, las cuales son objeto del proyecto.

3.2.2. Información para la determinación de la vulnerabilidad humana

Es importante mencionar que para este componente del riesgo se realizó en febrero 2009, una serie de encuestas (Anexo E) directamente en algunos predios de la zona de estudio con el fin de orientar, recopilar, complementar y de alguna manera verificar las condiciones de exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia de la población que pueden afectar o aportar en la comunidad cuando se presente un evento de contaminación del agua. Este formato se presenta en este mismo capítulo, en el numeral de herramientas.

3.2.2.1. Exposición

La exposición es obtenida como la densidad poblacional en cada unidad de análisis espacial, expresada en cantidad de habitantes sobre unidad de área. Para la obtención del índice de exposición y para el establecimiento de los rangos se utilizó la siguiente información:

- Resolución de Corantioquia No 9328 de 2007, donde se establecen los límites sobre las densidades máximas en suelo suburbano, rural, de protección y de parcelaciones para vivienda campestre. Para el caso específico de la zona de estudio se tienen establecidos estos valores para los municipios de Cáceres y Caucasia.
- Atlas Veredal del Departamento de Antioquia. Gobernación de Antioquia, Departamento Administrativo de Planeación, 2007.
- Anuario estadístico de Antioquia 2008 (Gobernación de Antioquia, 2009).
- Base de datos del Sistema de identificación y selección de beneficiarios, SISBEN, 2009.
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)
- Cartografía básica a escala 1:25000 producida por el IGAC y convertida a formato digital por Corantioquia.

3.2.2.2. Fragilidad socioeconómica

Para la obtención de la fragilidad socioeconómica se utilizó la base de datos del sistema de identificación y selección de beneficiarios (SISBEN), la cual reposa en las administraciones municipales de Caucasia y Cáceres (Anexo F). Esta base de datos recopila la información relacionada con la cobertura de acueducto, nivel educativo, nivel de ingresos y cobertura en salud. Para la variable relacionada con la cultura, además de la información del SISBEN, fueron visitadas y consultadas las respectivas dependencias de las administraciones municipales que tienen vínculo con en el tema. En el caso de las veredas San José del Man y El Man, no se tiene la información específica de las variables utilizadas, por tal razón se usaron los datos obtenidos en las publicaciones estadísticas de la Gobernación.

Inicialmente para la variable de cobertura en salud, se había considerado la información facilitada en la ficha de encuesta del SISBEN, la cual indicaba que un alto porcentaje de la población no presentaba cobertura para la atención en salud. (Tabla 3-19).

Nombre	Población sin Cobertura en servicios de Salud
Santa Rosita	91,70
Campo Alegre	85,97
El Man	ND*
El Jardín	66,43
Guarumo	67,83
Manizales	49,90
San José del Man	N.D*
Río Man	73,78
Las Pampas	73,98
Santa Lucia	66,36
Nicaragua	66,27

* ND No Disponible.

Tabla 3-19 Información de las fichas del SISBEN

Sin embargo, debido a la asignación de subsidios y beneficios sociales que brinda el estado a la población identificada y seleccionada por el SISBEN, las coberturas mejoraron notablemente, alcanzando unos porcentajes de cobertura en afiliación a la seguridad social en lo rural por encima del 72% para los municipios de Caucasia y Cáceres (Gobernación de Antioquia, 2009).

3.2.2.3. Falta de resiliencia

Para la determinación de esta variable de la vulnerabilidad humana se tuvieron en cuenta las evidencias recopiladas en los recorridos en campo por la zona de estudio, las conversaciones sostenidas con los líderes comunales y las siguientes fuentes de información:

- Plan de Desarrollo municipal, 2008-2011. Todos valen en una Caucasia productiva y competitiva. Municipio de Caucasia.
- Plan de Desarrollo municipal, 2008-2011. Nuestro compromiso es con el pueblo. Municipio de Cáceres.
- Planes de ordenamiento territorial de los municipios de Caucasia y Cáceres. (2000 y 2001)
- Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado. Municipio de Caucasia (2006).
- Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado. Municipio de Cáceres (2007).
- Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. Municipio de Caucasia (2008).
- Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. Municipio de Cáceres (2008).

3.2.2.4. Vulnerabilidad humana

Como se expuso anteriormente, para la estimación de la vulnerabilidad se debe recopilar la información de las variables utilizadas en la determinación de los componentes: exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia. En este punto se destaca la colaboración de las administraciones municipales y Corantioquia, por brindar la información requerida, igualmente se recalca la recopilación de información directamente en campo mediante, observación, conversaciones con líderes, profesores y habitantes y el diligenciamiento del formato de encuesta sobre los aspectos poblacionales, educativos, económicos, de salud y culturales.

En este componente se utilizaron también las fuentes de información que permitieron el entendimiento y la aplicación de las metodologías de análisis jerárquico de variables y análisis de consistencia de la información.

3.2.3. Información para la determinación del riesgo a la contaminación

Con respecto a la determinación del riesgo, las fuentes de información utilizadas se refieren a la definición conceptual y metodológica que contiene un proyecto de evaluación del riesgo a la contaminación y la transferencia de experiencias en el desarrollo del proyecto, destacando los siguientes:

- Curso "Pautas conceptuales y metodológicas acerca de la evaluación y gestión del riesgo de contaminación de acuíferos" dictado en el marco del proyecto "Estrategias de gestión del riesgo de contaminación de acuíferos freáticos en áreas peri-urbanas y rurales. Aplicabilidad, análisis, potencialidades y restricciones en dos países de América Latina", del Programa de Cooperación Científico-Tecnológico entre el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la República Argentina (MINCYT) y el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS). Agosto, 2009.
- II Ciclo de Jornadas Técnicas de Discusión de la Cátedra del Agua. Gestión del Riesgo, asociada al recurso hídrico. Septiembre de 2008.
- Seminarios que hacen parte de los requisitos de la maestría. Presentación y discusión sobre los avances realizados en los proyectos de maestría, en los cuales se dan las observaciones y orientaciones por parte de profesionales en el área de las ciencias sociales y la ingeniería. (Noviembre 2008 y Junio 2009).
- Avance en el planteamiento para la determinación del riesgo a la contaminación planteado por Betancur (2008), en el proyecto "Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: el Bajo Cauca Antioqueño".
- Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG aplicación en acuíferos del sur de España (Vías, 2005).
- Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales, elaborado por Foster *et al*, (2002) y Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). Banco Mundial.

3.2.4. Herramientas para la determinación del riesgo y sus componentes

Todo el proceso de elaboración de los mapas de riesgo está basado en el manejo de un gran número de variables, por lo que es necesario utilizar una serie de herramientas informáticas que permita preparar los mapas temáticos de las variables inmersas en los componentes del riesgo. La herramienta informática por excelencia para el manejo de variables vinculadas con el territorio y por tanto con el riesgo, se encuentra en los sistemas de información geográfica (SIG). La utilización del SIG es prácticamente indispensable por dos motivos, en primer lugar, por el gran volumen de información que se maneja y en segundo lugar, por su versatilidad en cuanto a transferencia de información con otros programas más ágiles para determinadas funciones. Igual que en los componentes del riesgo se utiliza ARCGIS, 9.3 soportado en el uso con la licencia adquirida por la Universidad de Antioquia. A continuación se presentan otra serie de herramientas que facilitan el desarrollo metodológico planteado para la evaluación del riesgo a la contaminación.

3.2.4.1. Herramientas para la determinación del peligro

Como se mencionó, para la determinación del índice de carga contaminante, componente del peligro a la contaminación de las aguas subterráneas, se retomó el formato diseñado por Gaviria (2005) (Figura 3-2), con el ánimo de actualizar y verificar qué factores de contaminación se estaban presentando en la zona.

FACTORES DE CONTAMINACION

RESPONSABLE: FECHA:
NOMBRE INFORMANTE:
NOMBRE DEL SITIO: SECTOR: CODIGO:
COORDENADAS N W

I. ACTIVIDAD RESIDENCIAL

1. Cual sistema de estos utiliza en el lugar para la recoleccion de las aguas residuales
Alcantarillado [01] pozo septico [02] Letrina [03] Zanjas [04] Otro [05]
2. En cual año se hizo la instalacion _____
3. Fecha de ultimo mantenimiento _____
4. Observaciones _____
5. A que distancia de la captacion se encuentra _____ (m)
6. Descargan las aguas residuales a una corriente superficial Si ☐ No ☐ 7. Cual _____ 8. Distancia _____(m)
9. Descargan las aguas residuales en el terreno Si ☐ No ☐ 10. Observacion _____
11. Que hacen con los residuos solidos generados en el lugar
Entierran [01] Queman [02] Arrojan a la corriente [03] Carro recolector [04] Captacion Abandonada [05]
12. Distancia _____ Cada cuanto _____ Cual _____ Frecuencia _____

II. ACTIVIDAD AGROPECUARIA

13. Tipo de cultivo _____ 14 Area utilizada _____
15. Utilizan agroquimicos Si ☐ No ☐ 16. Nombre del producto _____ 17.Empresa Productora _____ 18 Tel_____
19. Modo de aplicación _____ 20. Dosis _____
21. Utilizan las aguas residuales para riego Si ☐ No ☐
22. Tienen ganado Si ☐ No ☐
23. Utilizan el excremento de animales como abono Si ☐ No ☐
24. Hay drenajes ubicados en los establos Si ☐ No ☐ 25. Destino final de las aguas residuales _____

III. ACTIVIDAD MINERA

26. Alteracion del regimen hidraulico Si ☐ No ☐
27. Descarga de aguas residuales Si ☐ No ☐
28. Productos quimicos utilizados Si ☐ No ☐ 29 Cuales _____ 30 Modo de aplicación _____
31. Area de terreno intervenida _____
32. Residuos generados en el proceso Si ☐ No ☐ 33 Cuales _____

IV. ACCIDENTES AMBIENTALES

34. Derrames de quimicos Si ☐ No ☐ 35. Lugar _____
36. Animales al interior de la captacion Si ☐ No ☐ 37. Vivos Si ☐ No ☐
38. Materiales extraños al interior Si ☐ No ☐ 39 Cuales _____

V. OTROS

40. Cementerio Si ☐ No ☐ _____
41. Fumigaciones aereas Si ☐ No ☐ _____
42. Almacenamiento de combustibles Si ☐ No ☐ 43. Superficial Si ☐ No ☐

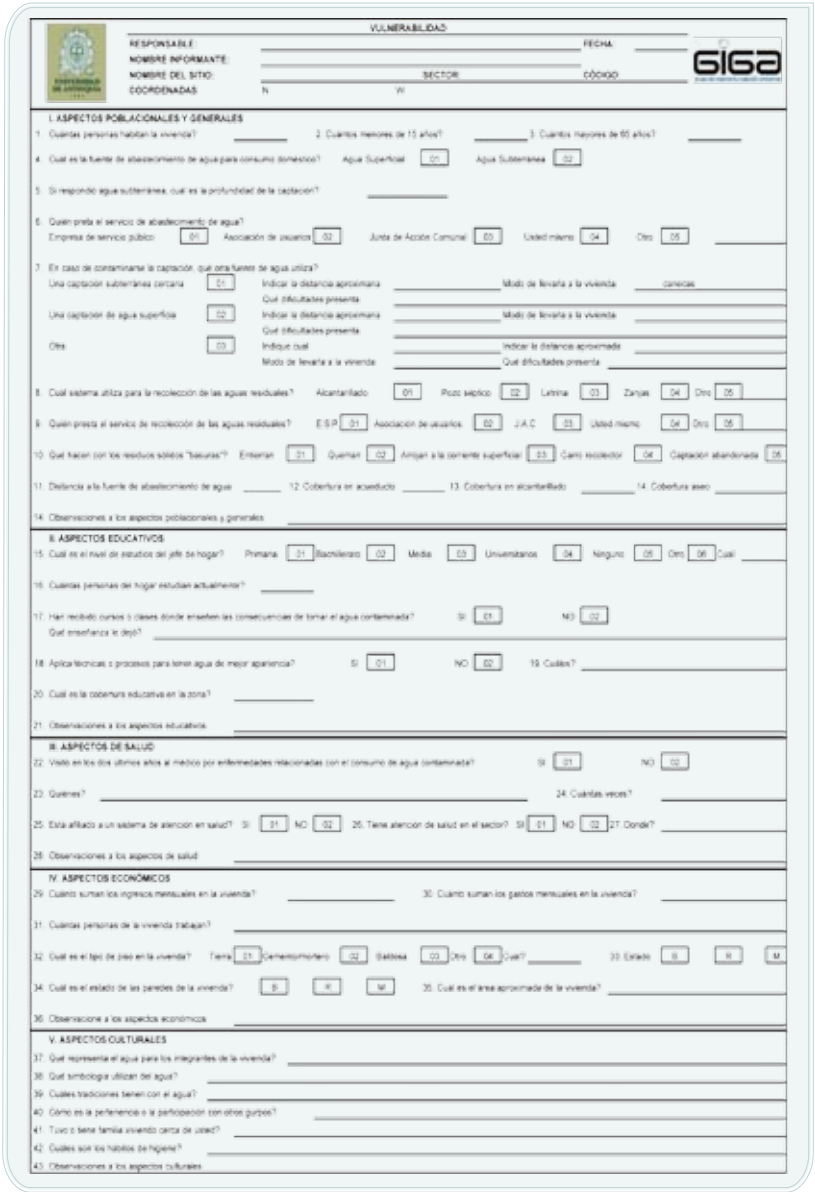
VI. OBSERVACIONES

Figura 3-2 Formato de encuesta para el inventario de carga contaminante

3.2.4.2. Herramientas para la determinación de la vulnerabilidad humana

Para la determinación de la vulnerabilidad humana se verificó y complementó información mediante la aplicación de una encuesta en algunos predios de la zona de estudio.

En la encuesta se resaltan aspectos poblacionales y generales relacionados con el número de habitantes en la vivienda, fuente de abastecimiento del agua, operador del servicio de acueducto, información sobre fuentes alternas de abastecimiento, entre otros. Se destaca también en el formato los aspectos educativos, resaltando el nivel de estudios del jefe de hogar, la cantidad de personas que estudian de la familia; entre los aspectos de salud, se menciona el acceso a servicios de salud, enfermedades relacionadas con las aguas sufridas en las familias. En los aspectos económicos, se relaciona el nivel de ingresos en la familia, cantidad de personas que trabajan, características de la vivienda y finalmente se tienen en cuenta algunos aspectos culturales como importancia, símbolos y tradiciones frente al recurso hídrico, pertenencia o arraigo a la zona y hábitos de higiene en las personas (Figura 3-3).



VULNERABILIDAD

RESPONSABLE: FECHA:
NOMBRE INFORMANTE:
NOMBRE DEL SITIO: SECTOR: CÓDIGO:
COORDENADAS: N W

GIGA

I. ASPECTOS POBLACIONALES Y GENERALES

1. Cuantas personas habitan la vivienda? ____ 2. Cuantos menores de 15 años? ____ 3. Cuantos mayores de 65 años? ____

4. Cual es la fuente de abastecimiento de agua para consumo domestico? Agua Superficial [01] Agua Subterranea [02]

5. Si respondió agua subterránea, cual es la profundidad de la captación? ____

6. Quien presta el servicio de abastecimiento de agua?
Empresa de servicios publico [01] Asociación de usuarios [02] Junta de Acción Comunal [03] Usted mismo [04] Otro [05] ____

7. En caso de contaminarse la captación, que otra fuente de agua utiliza?
Una captación subterránea cercana [01] Indicar la distancia aproximada ____ Modo de llevarla a la vivienda ____ cercas
Que dificultades presenta ____
Una captación de agua superficial [02] Indicar la distancia aproximada ____ Modo de llevarla a la vivienda ____
Que dificultades presenta ____
Otra [03] Indique cual ____ Indicar la distancia aproximada ____
Modo de llevarla a la vivienda ____ Que dificultades presenta ____

8. Cual sistema utiliza para la recolección de las aguas residuales? Alcantarillado [01] Pozo septico [02] Letrina [03] Zanjas [04] Otro [05] ____

9. Quien presta el servicio de recolección de las aguas residuales? E.S.P. [01] Asociación de usuarios [02] J.A.C. [03] Usted mismo [04] Otro [05] ____

10. Que hacen con los residuos sólidos "basuras"? Enterran [01] Queman [02] Arrojan a la corriente superficial [03] Carro recolector [04] Captación abandonada [05]

11. Distancia a la fuente de abastecimiento de agua ____ 12. Cobertura en acueducto ____ 13. Cobertura en alcantarillado ____ 14. Cobertura aseo ____

14. Observaciones a los aspectos poblacionales y generales ____

II. ASPECTOS EDUCATIVOS

15. Cual es el nivel de estudios del jefe de hogar? Primaria [01] Bachillerato [02] Media [03] Universitarios [04] Ninguno [05] Otro [06] Cual ____

16. Cuantas personas del hogar estudian actualmente? ____

17. Han recibido cursos o clases donde enseñen las consecuencias de tomar el agua contaminada? SI [01] NO [02]
Que enseñanza le dejó? ____

18. Aplica técnicas o procesos para tener agua de mejor apariencia? SI [01] NO [02] 19. Cuáles? ____

20. Cual es la cobertura educativa en la zona? ____

21. Observaciones a los aspectos educativos ____

III. ASPECTOS DE SALUD

22. Visitó en los dos últimos años al médico por enfermedades relacionadas (con el consumo de agua contaminada)? SI [01] NO [02]

23. Quienes? ____ 24. Cuantas veces? ____

25. Esta afiliado a un sistema de atencion en salud? SI [01] NO [02] 26. Tiene atencion de salud en el sector? SI [01] NO [02] 27. Donde? ____

28. Observaciones a los aspectos de salud ____

IV. ASPECTOS ECONÓMICOS

29. Cuanto suman los ingresos mensuales en la vivienda? ____ 30. Cuanto suman los gastos mensuales en la vivienda? ____

31. Cuantas personas de la vivienda trabajan? ____

32. Cual es el tipo de piso en la vivienda? Tierra [01] Cemento/mortero [02] Baldosa [03] Otro [04] Cual? ____ 33. Estado B [ ] R [ ] M [ ]

34. Cual es el estado de las paredes de la vivienda? B [ ] R [ ] M [ ] 35. Cual es el área aproximada de la vivienda? ____

36. Observacione a los aspectos económicos ____

V. ASPECTOS CULTURALES

37. Que representa el agua para los integrantes de la vivienda? ____

38. Que simbología utilizan del agua? ____

39. Cuales tradiciones tienen con el agua? ____

40. Cómo es la pertenencia o la participación con otros grupos? ____

41. Tuvo o tiene familia viviendo cerca de usted? ____

42. Cuales son los hábitos de higiene? ____

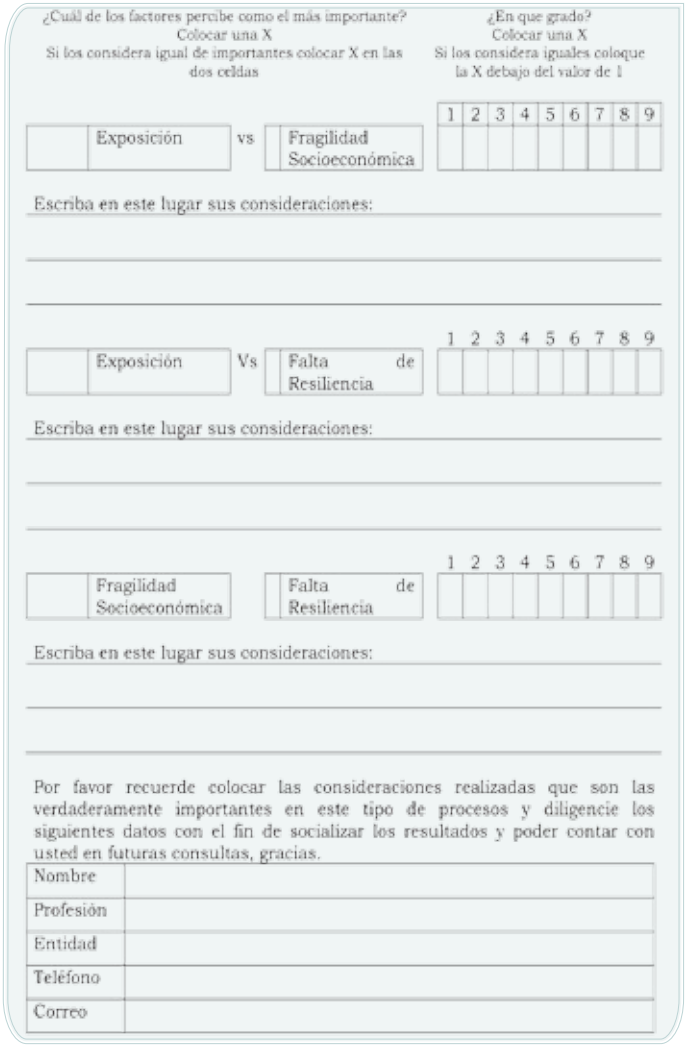
43. Observaciones a los aspectos culturales ____

Figura 3-3 Formato de encuesta, para la recopilación de información socioeconómica y cultural de la población

En la determinación de la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad humana se realizó un proceso de análisis jerárquico con varios colaboradores (16) interesados en el tema, el cual consistió en una comparación de atributos entre un par de factores. Primero se plantea la pregunta ¿Cuál de los dos pares comparados es el más importante? y segundo, ¿por cuánto? Una vez establecida la jerarquía, los criterios en cada nivel jerárquico se comparan por pares, usando una matriz de comparación y una escala numérica con valores correspondientes en orden de importancia, asignando los adjetivos: igual, moderada, fuerte, muy fuerte y extremadamente fuerte (Tabla 3-20).

Importancia o preferencia	Valor
Igual	1
Moderada	3
Fuerte	5
Muy Fuerte	7
Extremadamente fuerte	9

Tabla 3-20 Importancia o preferencia y valores



¿Cuál de los factores percibe como el más importante?
Colocar una X
Si los considera igual de importantes colocar X en las dos celdas

¿En que grado?
Colocar una X
Si los considera iguales coloque la X debajo del valor de 1

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Exposición vs Fragilidad Socioeconómica

Escriba en este lugar sus consideraciones:

Exposición Vs Falta de Resiliencia

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Escriba en este lugar sus consideraciones:

Fragilidad Socioeconómica Falta de Resiliencia

1 2 3 4 5 6 7 8 9

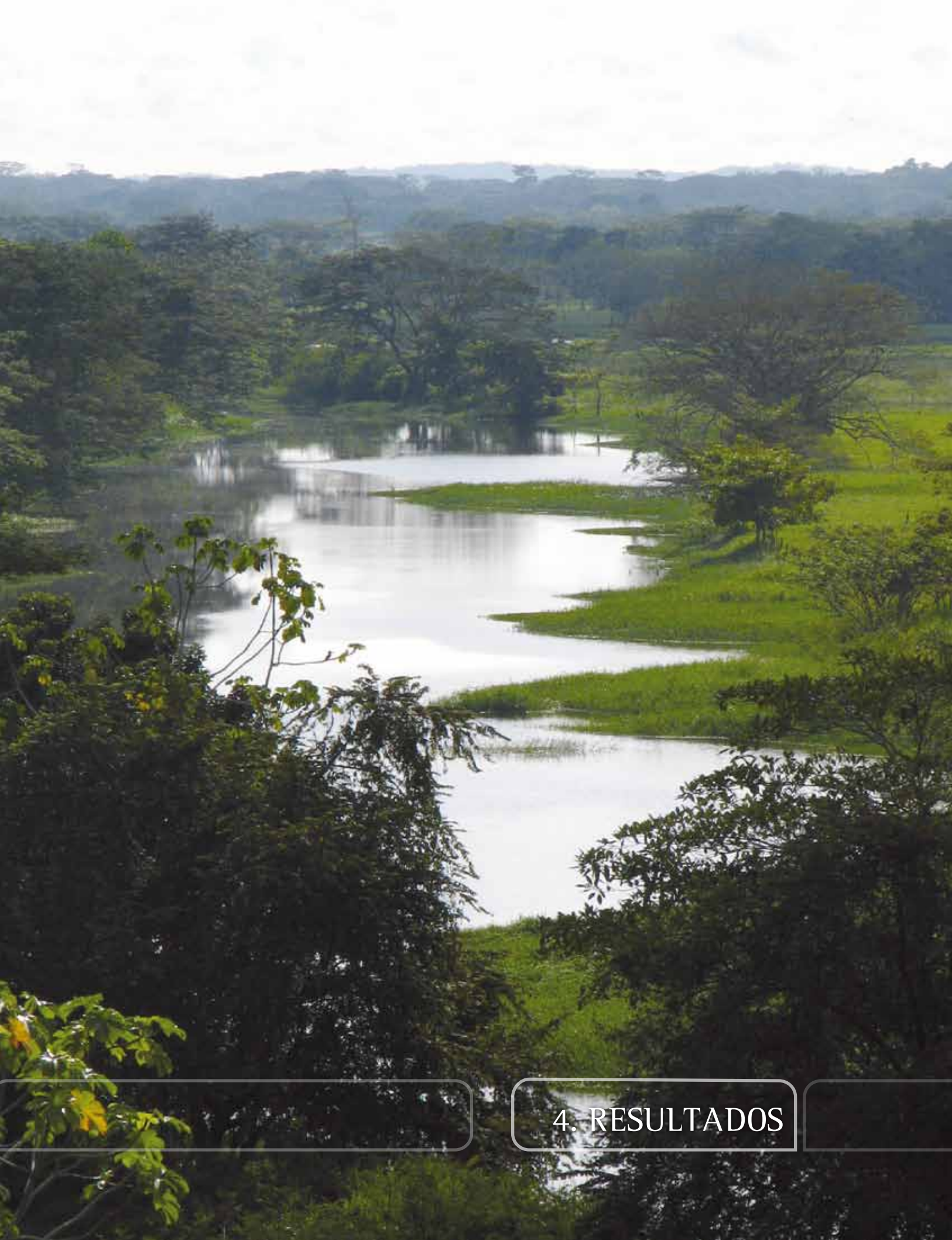
Escriba en este lugar sus consideraciones:

Por favor recuerde colocar las consideraciones realizadas que son las verdaderamente importantes en este tipo de procesos y diligencie los siguientes datos con el fin de socializar los resultados y poder contar con usted en futuras consultas, gracias.

Nombre	
Profesión	
Entidad	
Teléfono	
Correo	

En la escala anterior los valores pares se asignan para denotar importancias o preferencia intermedias entre dos valores nones (por ejemplo, el valor de 2 corresponde a una importancia entre igual y moderada). Con la ilustración anterior se procedió a diligenciar la encuesta, formato que se presenta en la Figura 3-4. (Anexo G).

Figura 3-4 Formato de encuesta realizada para obtener el coeficiente de importancia entre las variables de la vulnerabilidad humana



4. RESULTADOS

“La fragilidad socioeconómica, considera cinco (5) variables que permiten evaluar qué tan preparada está una comunidad para responder ante un evento de contaminación, ellas son: a) cobertura en el servicio de acueducto, b) nivel educativo, c) nivel de ingresos, d) cobertura en atención en salud y e) cultura ancestral.”

4. RESULTADOS

En este aparte del informe se da cuenta de los resultados obtenidos mediante la metodología de evaluación del riesgo propuesta.

4.1. Determinación del peligro a la contaminación y sus componentes

4.1.1. Vulnerabilidad intrínseca del acuífero

Para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero ubicado en la zona de estudio, se retoman los datos y resultados obtenidos por Rueda (2006) y Betancur (2008) (Figura 4-1); se aclara que para el estudio actual de riesgo a la contaminación se actualizó la información relacionada con la profundidad del nivel freático, a partir de los datos obtenidos de la red de monitoreo que opera en la zona la Universidad de Antioquia (Universidad de Antioquia, 2009).

Una vez organizados los mapas temáticos para cada una de las variables consideradas en la aplicación de la metodología DRASTIC, se realiza la operación de algebra de mapas, utilizando un tamaño de celda 100*100. Esta operación, permitió calcular el grado de vulnerabilidad para la zona de estudio, obteniendo valores que varían desde 95 hasta 159. En este punto, retomando lo expuesto en el marco conceptual y metodológico (Figura 3-1), de acuerdo con las recomendaciones realizadas por Foster *et al* (2002) y a las aplicaciones realizadas por Rueda y Betancur (2006), se establecen los rangos e índices de vulnerabilidad en cinco categorías.

De acuerdo con lo anterior y como se ilustra en la Figura 4-2 en la zona de estudio se presentan dos tipos de vulnerabilidades: en el 89% del área se presenta un índice de vulnerabilidad moderada y en el 11% restante un índice de vulnerabilidad baja. Los demás índices de vulnerabilidad, muy baja, alta y extrema no se presentan en la zona de estudio.

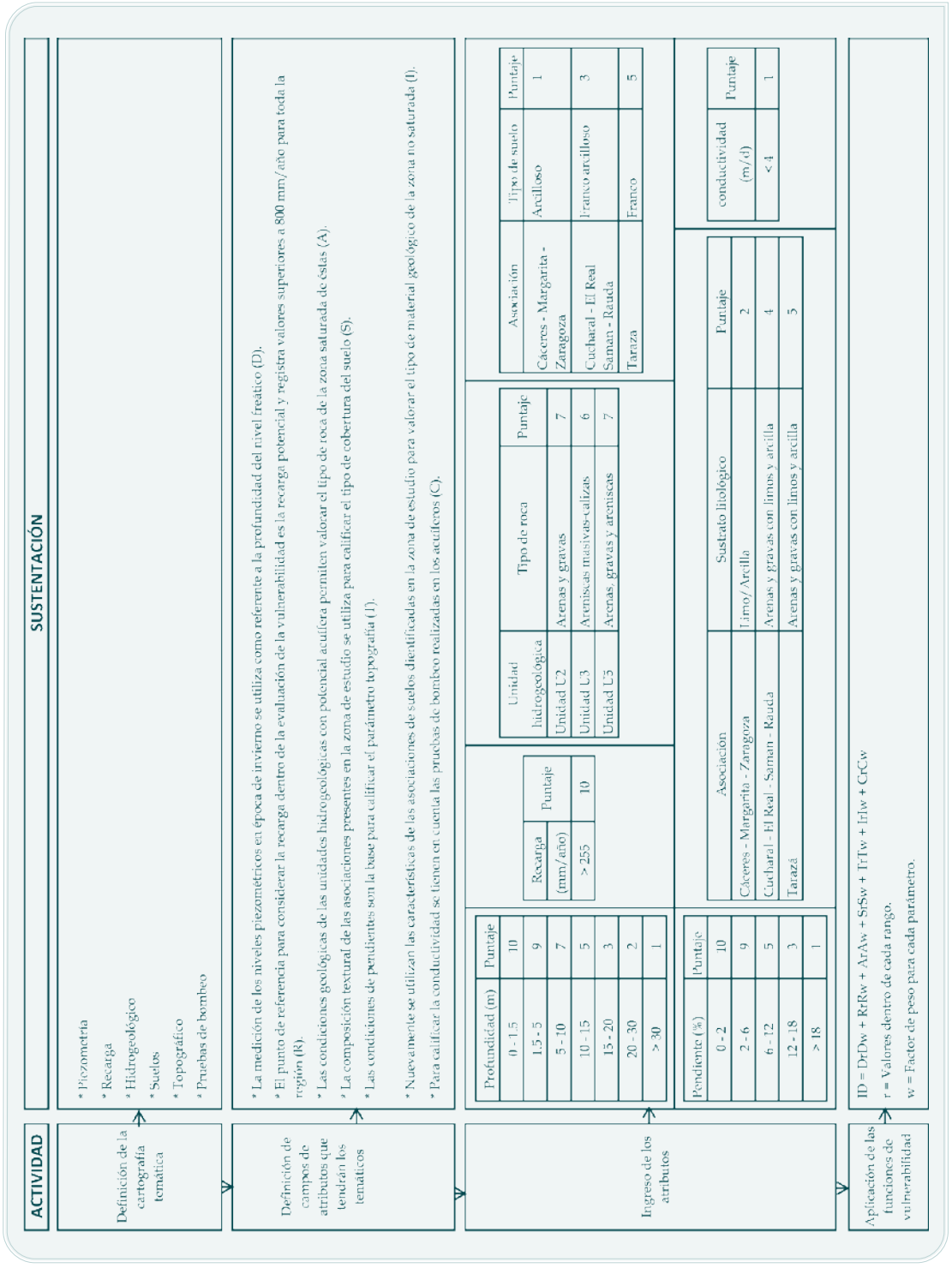


Figura 4-1 Sustentación y definición de los atributos para la aplicación de la metodología DRASTIC. Figura tomada de Rueda, 2006

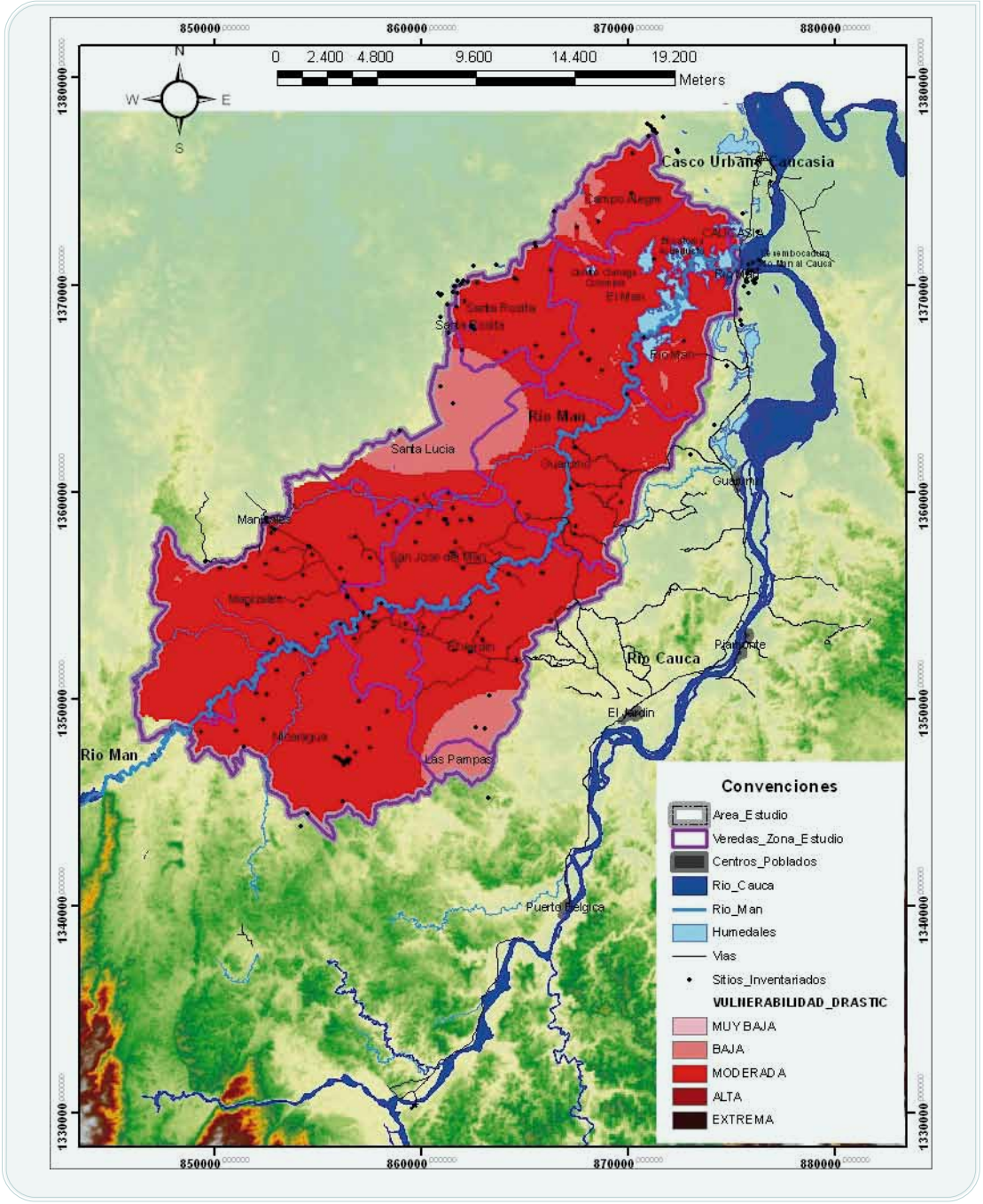


Figura 4-2 Mapa de vulnerabilidad del medio acuífero, según método DRASTIC

Es importante destacar que la única vereda con el 100% del territorio perteneciente al área de estudio con índice de vulnerabilidad baja es Las Pampas. Otra vereda con gran porcentaje del territorio en este grado de vulnerabilidad es Santa Lucia. Las demás veredas presentan alguna porción del territorio con índice de vulnerabilidad bajo, como Manizales, Nicaragua, El Jardín, Guarumo, Río Man, Santa Rosita, El Man y Campo Alegre, haciendo énfasis que la mayor proporción del área de las veredas en mención poseen un índice de vulnerabilidad moderada. La única unidad de análisis espacial que posee un índice de vulnerabilidad moderada en todo el territorio es la vereda San José del Man.

4.1.2. Carga contaminante

En el año 2006 se realizó un trabajo de inventario de carga contaminante en la zona de estudio y su entorno más próximo (Betancur, 2008). Esa información se retomó y complementó durante una jornada de actualización e inventario realizada en el primer trimestre del año 2009. Durante la realización de la jornada en mención se hizo un recorrido en campo, visualizando e identificando las fuentes que potencialmente pudieran generar un tipo de contaminación al recurso hídrico subterráneo. En este punto se retomó la propuesta de Gaviria y Betancur (2005 y 2006) para realizar la caracterización de la carga contaminante al acuífero libre ubicado en la zona de estudio, identificándose las principales actividades contaminantes asociadas a desarrollo urbano, producción agrícola, producción pecuaria, extracción minera y accidentes ambientales.

Cada una de estas actividades fue clasificada en subclases con el fin de obtener con mayor detalle los elementos constitutivos que generan posiblemente una carga contaminante al acuífero libre, para mayor ilustración se presenta la Tabla 4-1.

Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
DU Desarrollo Urbano	Saneamiento	Aguas residuales	Zona Urbana	Alcantarillado		DU01
				Lagunas de Oxidación		DU02
				Plantas de tratamiento	Corriente	DU03
					Terreno	DU04
				Descarga de Agua Residual	Corriente	DU05
					Terreno	DU06
					Laguna	DU07
			Zona Rural	Alcantarillado		DU08
				Lagunas de Oxidación		DU09
				Plantas de tratamiento	Corriente	DU10
					Terreno	DU11
				Descarga de Agua Residual	Corriente	DU12
					Terreno	DU13
					Laguna	DU14
			Zona Urbano/Rural	Pozo séptico		DU15
				Letrina		DU16
				Zanjas		DU17
		Residuos sólidos	Zona Urbana	Relleno Sanitario		DU18
			Zona Urbano/Rural	Botadero a cielo abierto		DU19
				Excavación		DU20
				Corriente superficial		DU21
				Aljibes abandonados		DU22
	Almacenamiento de Combustibles	En superficie				DU23
		Enterrados				DU24
	Sumideros de carretera					DU25
	Cementerios					DU26

Clase	Subclase 1	Subclase 2	Subclase 3	Subclase 4	Subclase 5	Categoría
PA Producción Agrícola	Cultivo Extensivo	Plaguicida	Aspersión			PA01
			Irrigación			PA02
		Fertilizantes	Aspersión			PA03
			Irrigación			PA04
		Agua residuales	Aspersión			PA05
			Irrigación			PA06
	Cultivo de Pan Coger	Plaguicida	Aspersión			PA07
			Irrigación			PA08
		Fertilizantes	Aspersión			PA09
			Irrigación			PA10
		Aguas Residuales	Aspersión			PA11
			Irrigación			PA12
PP Producción Pecuaria	Actividad Ganadera	Extensiva	Efluentes a Lagunas			PP01
			Efluentes al terreno			PP02
			Efluentes a corriente			PP03
		Pocas Cabezas	Efluentes a Lagunas			PP04
			Efluentes al terreno			PP05
			Efluentes a corrientes			PP06
		Excremento como abono				PP07
	Actividad avícola	Industrial				PP08
		Casera				PP09
		Excremento como abono				PP10
	Actividad Porcícola	Industrial				PP11
		Casera				PP12
		Excremento como abono				PP13
	Actividad piscícola	Industrial				PP14
		Casera				PP15
		Excremento como abono				PP16
EM Extracción Minera	Actividad Minera Metales	Cielo Abierto				EM01
		Subterránea				EM02
	Actividad Minera Cantera					EM03
	Actividad Minera Carbón					EM04
	Actividad Minera Petróleo					EM05
AA Accidente Ambiental	Derrames	Laguna				AA01
		Suelo				AA02
		Corriente				AA03
	Animales	Vivos				AA04
		Muertos				AA05
	Materiales Extraños					AA06

Tabla 4-1 Clases y categorías de actividades potencialmente generadoras de carga contaminante. Tomado de Gaviria y Betancur, 2005 y 2006

En el caso de Desarrollo Urbano se presentan las subclases, saneamiento básico, almacenamiento de combustibles, sumideros de carretera y cementerios, las cuales poseen a su vez varias subclases relacionadas con las características específicas de la actividad, como tipo de descarga, manejo, ubicación, modo, entre otros. El código para cada categoría resultante está formado por las letras iniciales de la actividad principal, seguida por un consecutivo de dos dígitos, comenzando en 01, así por ejemplo la actividad desarrollo urbano con las subclases de saneamiento/ aguas residuales/ zona urbana/ alcantarillado le corresponde la categoría DU01.

Para la zona de estudio se construyó una base de datos que permitiera almacenar y actualizar el índice de carga contaminante asociado a cada tipo de actividad principal generadora de carga contaminante presente en la zona. Es importante mencionar que durante los trabajos realizados en los años 2006 y 2009 no se logró realizar un cubrimiento total de la zona de estudio, obteniendo así un volumen de datos inferior al logrado mediante la realización del inventario de puntos de agua. Debido a esta situación se realizó una revisión y análisis de la información recopilada en ese inventario (Corantioquia – Universidad de Antioquia, 2003 y 2004), extrayendo así la información relacionada con las fuentes potencialmente generadoras de carga contaminante, partiendo del supuesto que todo sitio que demande agua para cualquier tipo de consumo, debe generar un vertimiento asociado a ese mismo tipo de uso. De acuerdo con lo anterior se obtienen los mapas de carga contaminante por desarrollo urbano, producción pecuaria, producción agrícola, extracción minera y accidentes ambientales.

4.1.2.1. Desarrollo Urbano

En relación con el Desarrollo Urbano, los sistemas de alcantarillado no deberían presentar fugas, sin embargo en el momento del diseño, operación y mantenimiento se pueden cometer errores que lleven a inconvenientes, también se pueden presentar conexiones ilícitas que pueden provocar fugas, así como la falta de mantenimiento y de reposición de redes antiguas.

Ésta categoría se presenta en Jardín, Manizales, Invasión Río Man y Guarumo lugares en los cuales, según información recogida en campo, el sistema de alcantarillado no tiene un óptimo funcionamiento, llegando a casos especiales como el de Jardín, el cual se desbordó por la obstrucción de las tuberías. La mayoría de las veredas tienen asociado un índice de carga contaminante elevado por la existencia de las condiciones de saneamiento en el tema de agua residuales domésticas (ICC, varía entre 0,64 y 0,75) y el manejo de los residuos sólidos (ICC, varía entre 0,64 y 0,78).

Hay dos sectores de veredas en la zona de estudio que presentan bajo número de actividades que generen un índice de carga contaminante elevado, ellas son: Las Pampas y Río Man. Las veredas Manizales, Nicaragua, El Jardín, Santa Rosita y Campo Alegre, presentan sitios en los cuales hay almacenamiento de combustibles en superficie (ICC = 0,46) y en la estación de servicio ubicada en Río Man se almacenan bajo superficie (ICC = 0,58), lo cual indica un potencial de carga contaminante moderado.

Finalmente, se identifican aquellos sitios donde hay cementerios (ICC=0,62), índice potencial de carga contaminante elevado, agregando a esta categoría, los predios en los cuales se entierra el ganado y/o diferentes animales. Se destacan en esta actividad los predios ubicados en la vereda Nicaragua, le sigue en orden Manizales, El Jardín, San José del Man y Santa Rosita y en menor o ninguna presencia Campo Alegre, Río Man, El Man, Guarumo, Santa Lucia y La Pampas. (Figura 4-3).

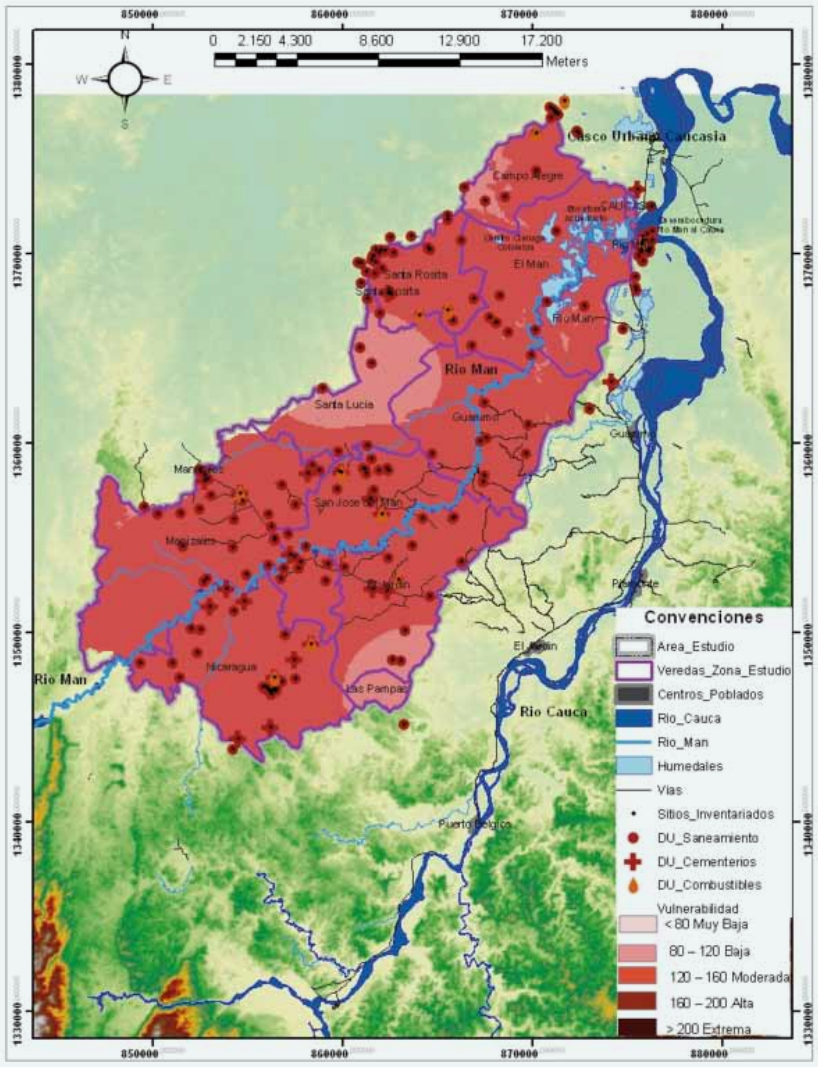


Figura 4-3 Índice potencial de carga contaminante por actividades de Desarrollo Urbano

4.1.2.2. Producción agrícola

Se presentan cultivos extensivos en las veredas Manizales, Nicaragua, San José del Man y Santa Rosita, en los cuales utilizan plaguicidas por aspersión o fertilizantes por irrigación. Estas dos subclases de esta categoría presentan un índice de carga contaminante elevado que varía de 0,61 a 0,74. Las demás veredas no presentan este tipo de fuente potencial de contaminación. En los cultivos de pancoger que son tratados con plaguicidas y aplicados mediante aspersión se obtuvo índice de carga contaminante moderado (ICC = 0,53), esta subactividad se presenta en gran cantidad en la vereda Nicaragua, Manizales y San José del Man, y en menor proporción, en El Jardín, Santa Lucia, El Man y Campo Alegre. Las veredas de Las Pampas, Guarumo, Santa Rosita y Río Man, no presentan este tipo de subactividad potencialmente contaminante. Las actividades de cultivos de pancoger que presentan un índice de carga

contaminante potencial elevado se asocian a la aspersión de fertilizantes (ICC=0,77) y a la irrigación de aguas residuales (ICC = 0,66). Estas subactividades se presentan en gran cantidad nuevamente en la vereda Nicaragua, Manizales y San José del Man, adicionalmente también se presenta en Santa Rosita, y en menor cantidad El Jardín y Campo Alegre. El Man, Río Man, Guarumo, Santa Lucía y Las Pampas no presentan este tipo de fuente potencial de contaminación (Figura 4-4).

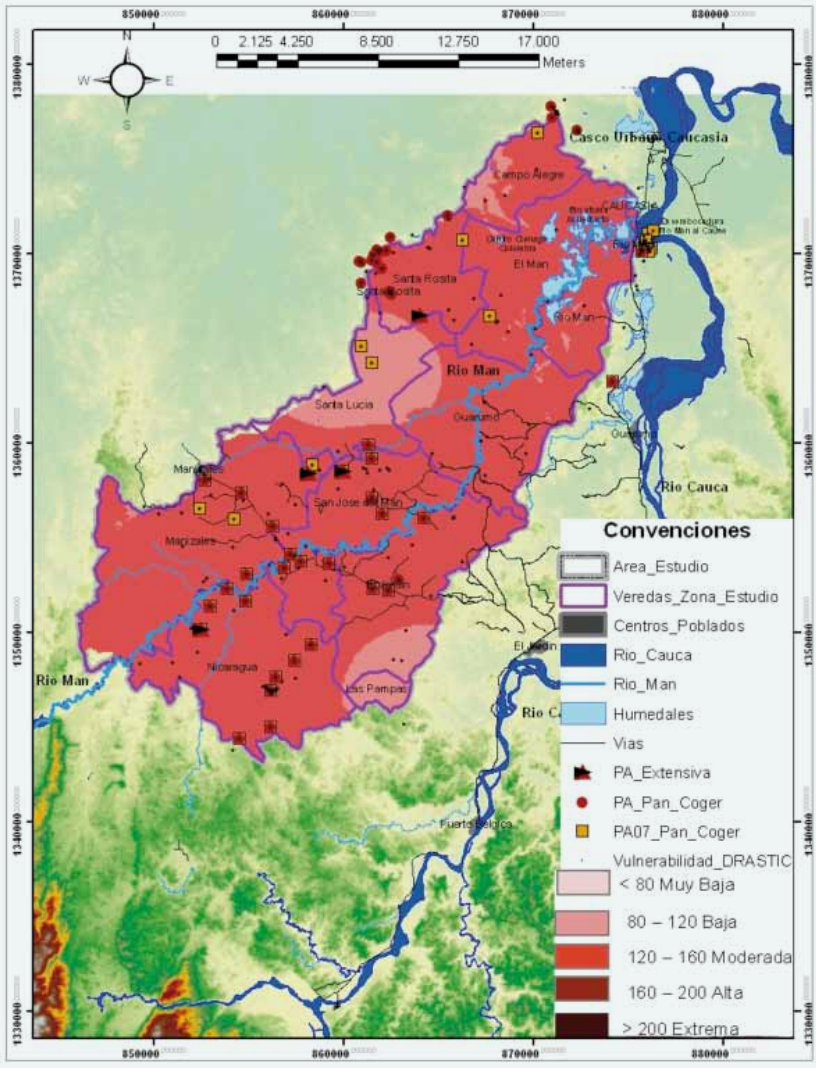


Figura 4-4 Índice potencial de carga contaminante por las actividades agrícolas

4.1.2.3. Producción pecuaria

En primera instancia se identifican las subactividades relacionadas con la ganadería extensiva y los efluentes provenientes de esta actividad en la mayoría de las veredas del área de estudio. Esto refleja y confirma la influencia que tiene la actividad ganadera en la economía de la región. Esta fuente potencial de contaminación está caracterizada con un índice elevado que varía de 0.69 a 0.80 dependiendo del lugar

donde se realiza la descarga, lagunas, terreno o corrientes. Cuando se hace el mapa de carga contaminante asociado a la actividad ganadera, se puede plantear un compendio, ya que todas las subclases planteadas para esta actividad arrojan un índice de carga contaminante elevado, el cual varía de 0,69 a 0,85. La Figura 4-5 presenta la actividad ganadera en la zona, agrupando la extensiva y la de pocas cabezas, y se resalta la influencia del estiércol del ganado utilizado como abono. En la vereda Santa Lucía sólo se identificó un sitio asociado a esta fuente potencial de contaminación y en Las Pampas ninguna.

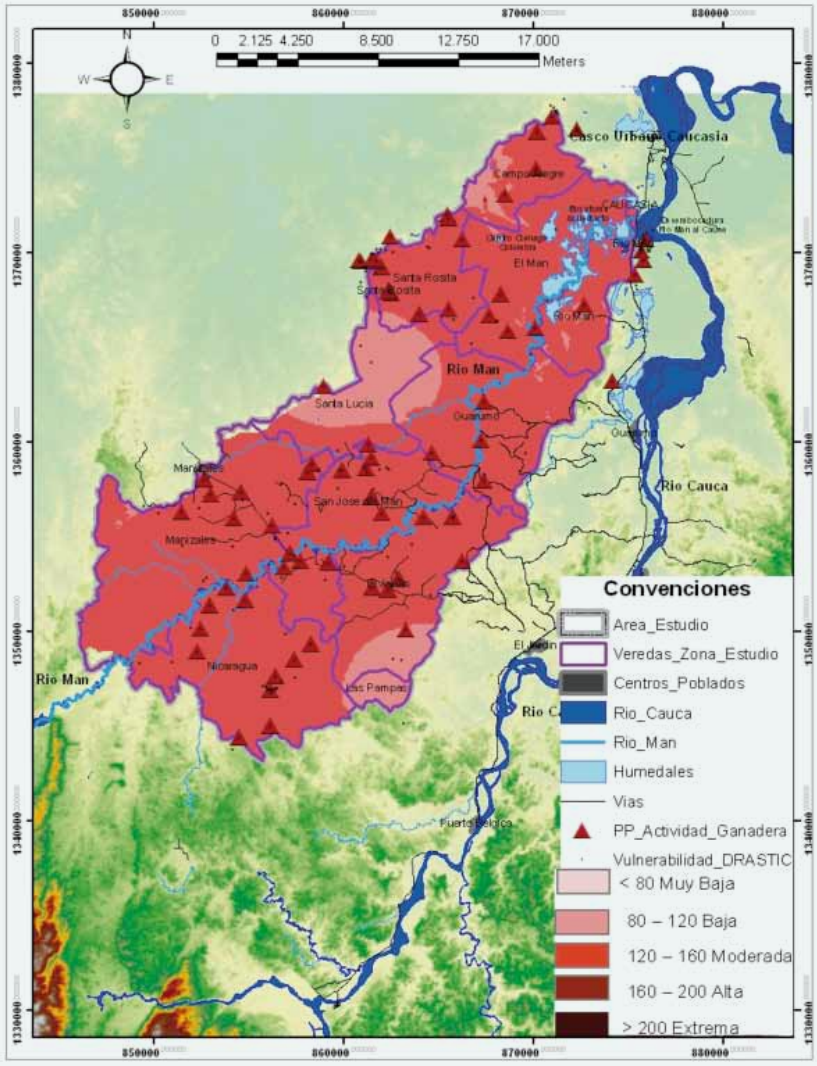


Figura 4-5 Índice potencial de carga contaminante por las actividades pecuarias

4.1.2.4. Extracción Minera

A pesar de ser una zona que dependió económicamente de la minería hace unos años, hoy en día son pocos los sitios en el área de estudio donde se realiza esta actividad. Es importante aclarar que los sitios que se presentan en la Figura 4-6, no implican

directamente que la actividad se esté realizando en el predio, es una representación de aquellos sitios en los cuales se pueda estar generando, o se tenga heredada una fuente potencial de contaminación debido a la actividad minera. En las veredas que se identificó una posible fuente de contaminación son Nicaragua, Manizales, El Jardín, San José del Man, Guarumo y Río Man, con un índice potencial de carga contaminante elevado, 0,72.

En este punto vale la pena mencionar que los muestreos realizados en el año 2008 en la bocatoma del acueducto del casco urbano del municipio de Caucasia ubicada a la margen izquierda del río Man, el centro de Cienaga Colombia y un punto ubicado cerca a la desembocadura del río Man al río Cauca, se detectaron trazas de Mercurio en agua y sedimento, lo cual evidencia que hay reactivación de la minería en la cuenca. (Corpomojana –Corantioquia, 2008).

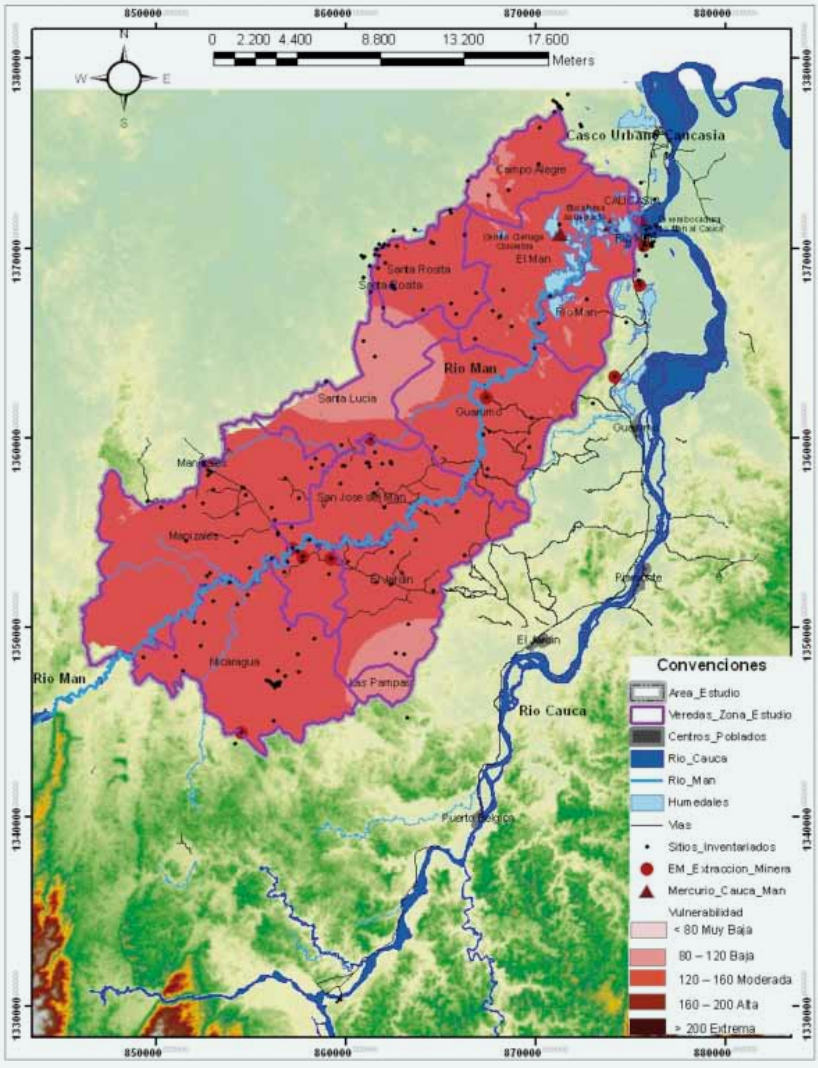


Figura 4-6 Índice potencial de carga contaminante por la actividad minera

4.1.2.5. Accidentes Ambientales

Como accidentes ambientales se presentan derrames de químicos en lagunas, terrenos o corrientes y la presencia de animales (vivos o muertos) y materiales extraños al interior de una captación. (Figura 4-7). En relación con los derrames sobre el terreno, se identificó en las cercanías de la Hacienda Acapulco, vereda Santa Lucía, una descarga de químicos sobre el suelo.

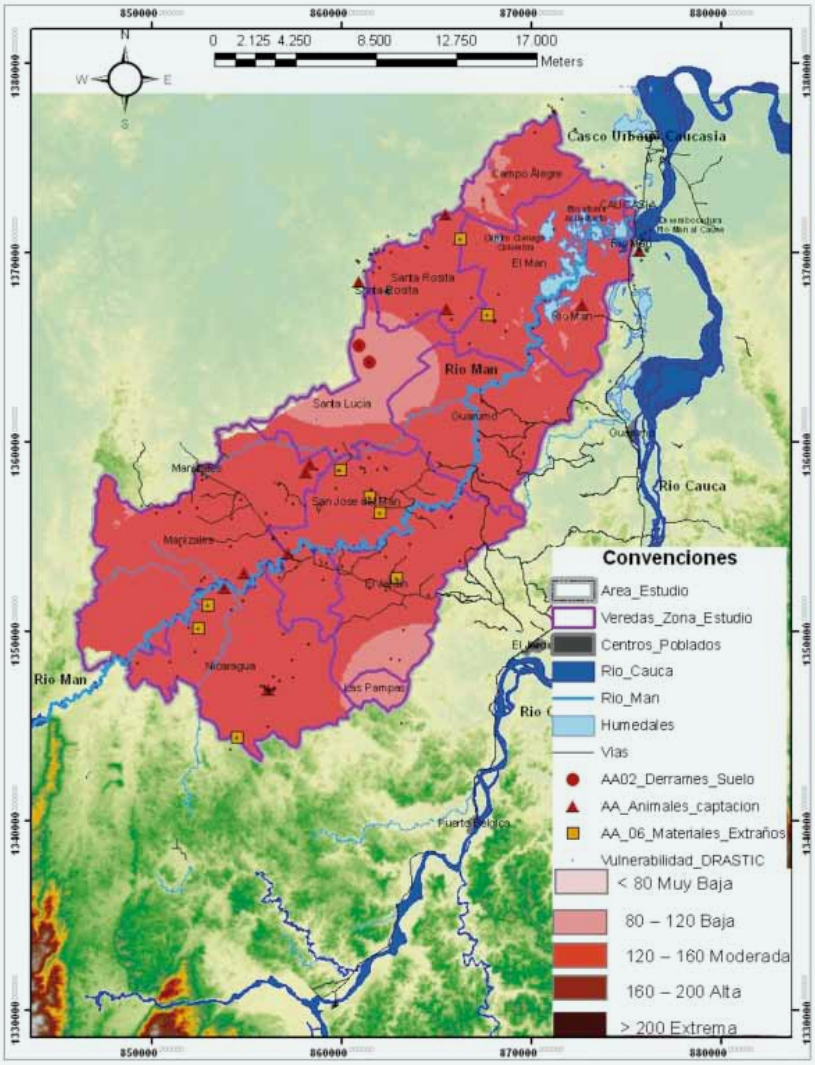


Figura 4-7 Índice potencial de carga contaminante por los accidentes ambientales

Esta situación ocurrió, según la versión de los habitantes de la zona por una avioneta que estaba perdiendo altura de vuelo y se vio obligada a soltar los contenedores del plaguicida, lo cual puede afectar notablemente los cultivos de pancoger, la biodiversidad, especialmente las fuentes de agua. Esta subclase está caracterizada con índice potencial de carga contaminante elevado, 0,61.

En algunos sitios de las veredas Nicaragua, Manizales, San José del Man, Santa Rosita, Río Man y El Man se identificaron puntos con este tipo de situación, la cual es caracterizada con índice potencial de carga contaminante elevado, variando el valor de 0,65 a 0,68 para animales vivos y muertos respectivamente. Los sitios inventariados en las veredas Las Pampas, El Jardín, Santa Lucía, Guarumo y Campo Alegre no tienen esta actividad identificada. Los sitios identificados con materiales extraños al interior de la captación están ubicados en las veredas Nicaragua, El Jardín, San José del Man y El Man, las demás veredas no presentan esta categoría la cual está caracterizada con índice potencial de carga contaminante moderado, 0,5.

4.1.3. Peligro a la contaminación

Después de obtener el mapa de vulnerabilidad del medio acuífero y teniendo los mapas de carga contaminante para cada actividad identificada y caracterizada, se procede con la superposición de mapas y el análisis matricial (Tabla 3-2) para identificar las diferentes categorías de peligro a la contaminación en la zona de estudio.

Para la clasificación del peligro se relacionó cada mapa de carga contaminante con la vulnerabilidad del medio, así se obtuvieron cinco mapas de peligro asociados específicamente a las actividades de desarrollo urbano, actividad agrícola, actividad pecuaria, extracción minera y accidentes ambientales.

4.1.3.1. Peligro a la contaminación por actividades de desarrollo urbano

Respecto al mapa de peligro asociado a la actividad de desarrollo urbano se obtuvo para todas las veredas del área de estudio, la presencia de fuentes potenciales de contaminación. El análisis matricial permitió interrelacionar la vulnerabilidad del medio físico determinada para la zona de estudio (Moderada y Baja) y índice potencial de carga contaminante para las categorías del saneamiento básico (disposición de aguas residuales y residuos sólidos), almacenamiento de combustibles y cementerios, obteniendo para la zona una categorización del peligro.

En las zonas con vulnerabilidad moderada y presencia de actividades relacionadas con el desarrollo urbano y cuyo ICC es elevado, se obtuvo un peligro a la contaminación de las aguas subterráneas Alto. Este peligro alto a la contaminación de las aguas subterráneas se encuentra ubicado en la mayoría de la zona de estudio (95%). En las zonas de vulnerabilidad Baja y con presencia de una actividad asociada al desarrollo urbano, cuyo índice potencial de carga contaminante es elevado, se obtiene un peligro Moderado, como es el caso de una parte de la vereda Santa Lucía. Revisten especial importancia aquellos sitios donde coinciden la vulnerabilidad moderada y la densidad de actividades con índice potencial de carga contaminante elevado, las cuales llevan a obtener zonas con peligro a la contaminación Extremo, debido a las múltiples posibilidades que en el mismo punto se estén descargando contaminantes al sistema acuífero. Algunas proporciones de área ubicadas en las veredas Nicaragua, Manizales, El Jardín, San José del Man y Campo Alegre, equivalente al 4% del total del área de la zona de estudio, presentan esta situación de peligro extremo asociado a la actividad de desarrollo urbano (Figura 4-8).

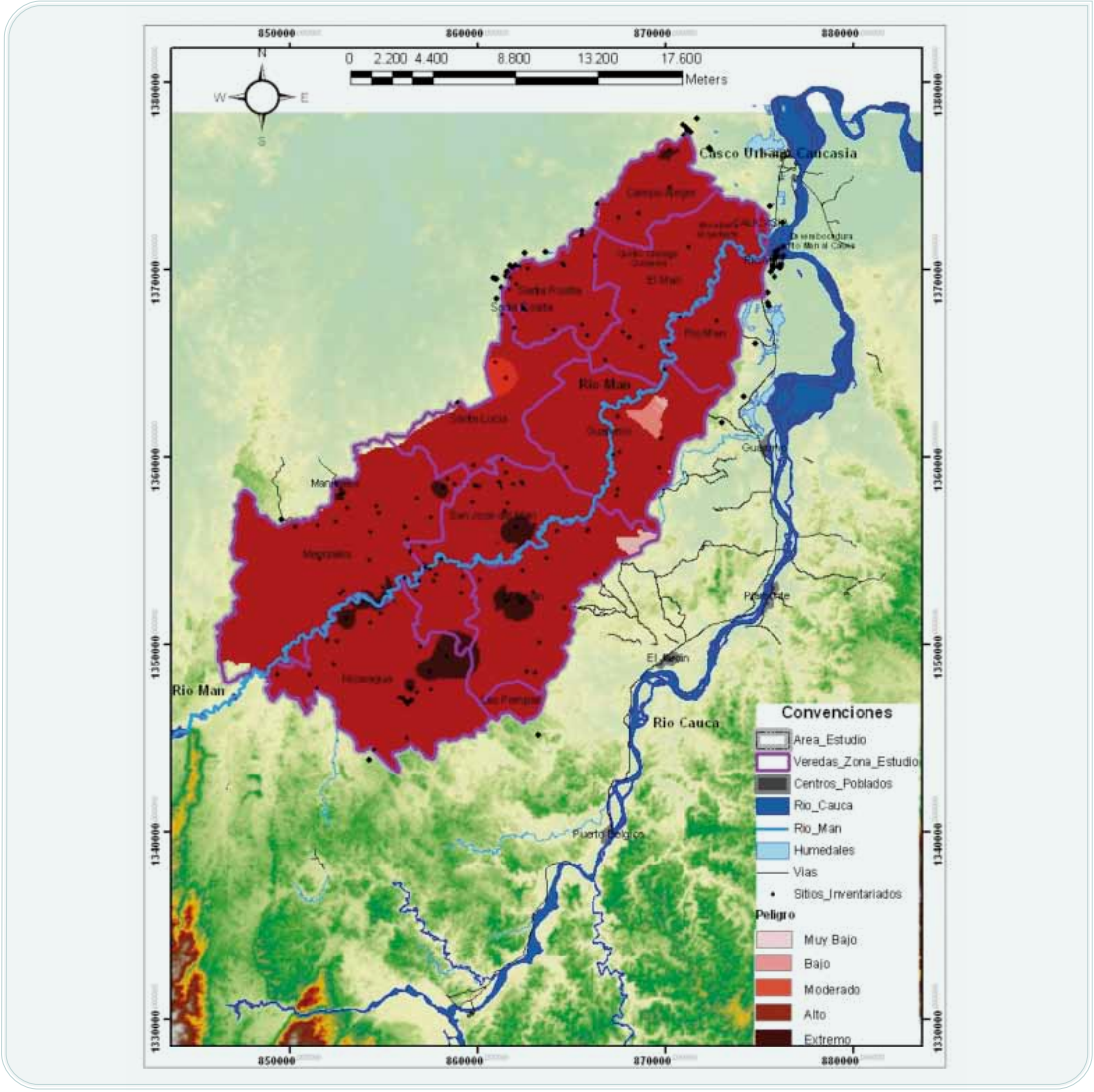


Figura 4-8 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades de Desarrollo Urbano

4.1.3.2. Peligro a la contaminación por actividades de producción agrícola

Las zonas con vulnerabilidad Baja no están siendo amenazadas por fuentes potenciales de contaminación asociadas a la producción agrícola con índice de carga contaminante elevado, por lo tanto, las zonas de Las Pampas, Santa Lucía, Guarumo, Río Man, El Man, Santa Rosita y Campo Alegre presentan peligro bajo a la contaminación, correspondiente al 13% de la zona de estudio. Con respecto a la interacción entre la vulnerabilidad moderada y los sitios donde se determinó índice potencial de carga contaminante elevado, se obtiene un peligro a la contaminación Alto. Este peligro Alto tiene la mayor cobertura de la zona (85%). Por último se presentan algunas zonas ubicadas en las veredas Nicaragua, Manizales y San José del Man, correspondientes al 2% del total del área de estudio, que presentan peligro a la contaminación extremo, debido a la interacción entre varias categorías de la producción agrícola en un mismo punto inventariado con índice de carga contaminante elevado y una zona con índice de vulnerabilidad moderado (Figura 4-9).

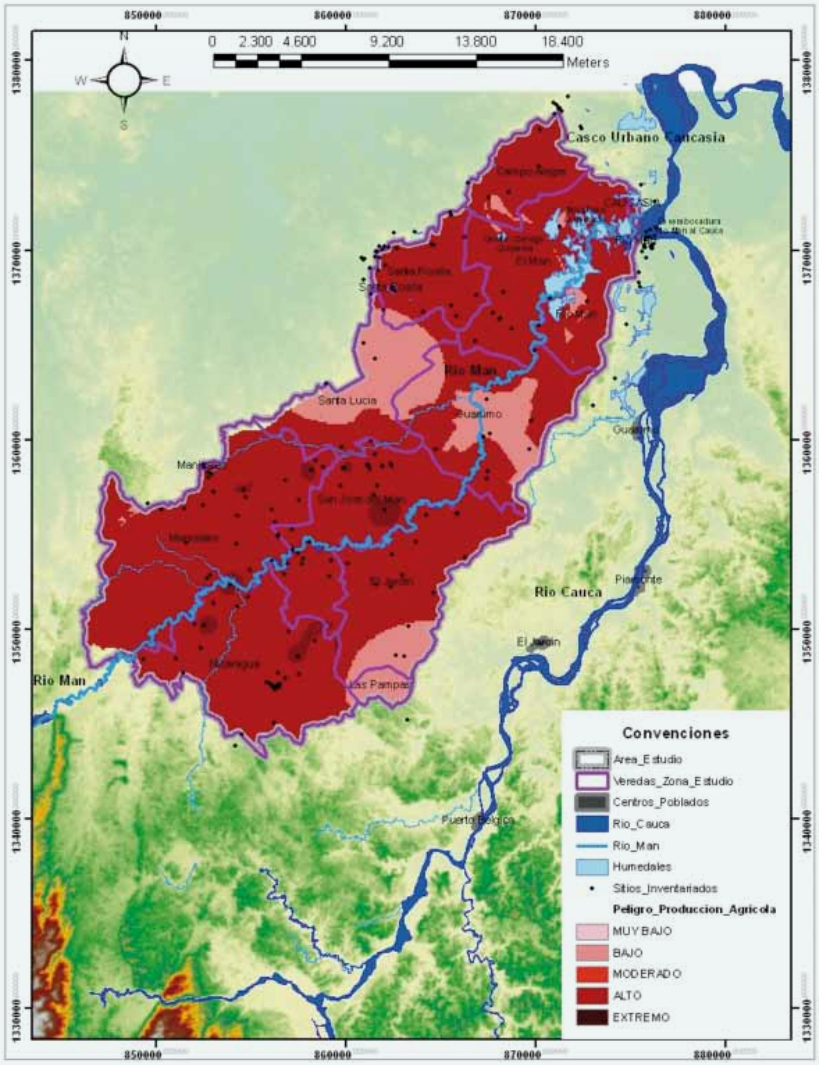


Figura 4-9 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por producción agrícola

4.1.3.3. Peligro a la contaminación por producción pecuaria

Como se mencionó en el numeral de carga contaminante, para esta actividad en particular se generalizaron todas las subclases relacionadas a la misma, debido a que las caracterizaciones realizadas arrojaron un índice potencial de carga contaminante elevado, por tal razón, la interacción entre los sitios correspondientes a este inventario con los grados de vulnerabilidad establecidos para la zona, permiten obtener una clase de peligro alto a moderado. En conclusión, para las zonas de Santa Lucía, Las Pampas, Río Man y El Man, se presentan zonas de peligro moderado a la contaminación (3%), mientras que el resto de la zona de estudio se clasifica con peligro alto a la contaminación (96%), exceptuando una proporción compartida entre las veredas Manizales y Nicaragua que poseen una clase de peligro extrema (1%), ya que se presentan varias (3) actividades en un mismo punto, que generan un potencial de carga contaminante elevado al recurso hídrico subterráneo (Figura 4-10).

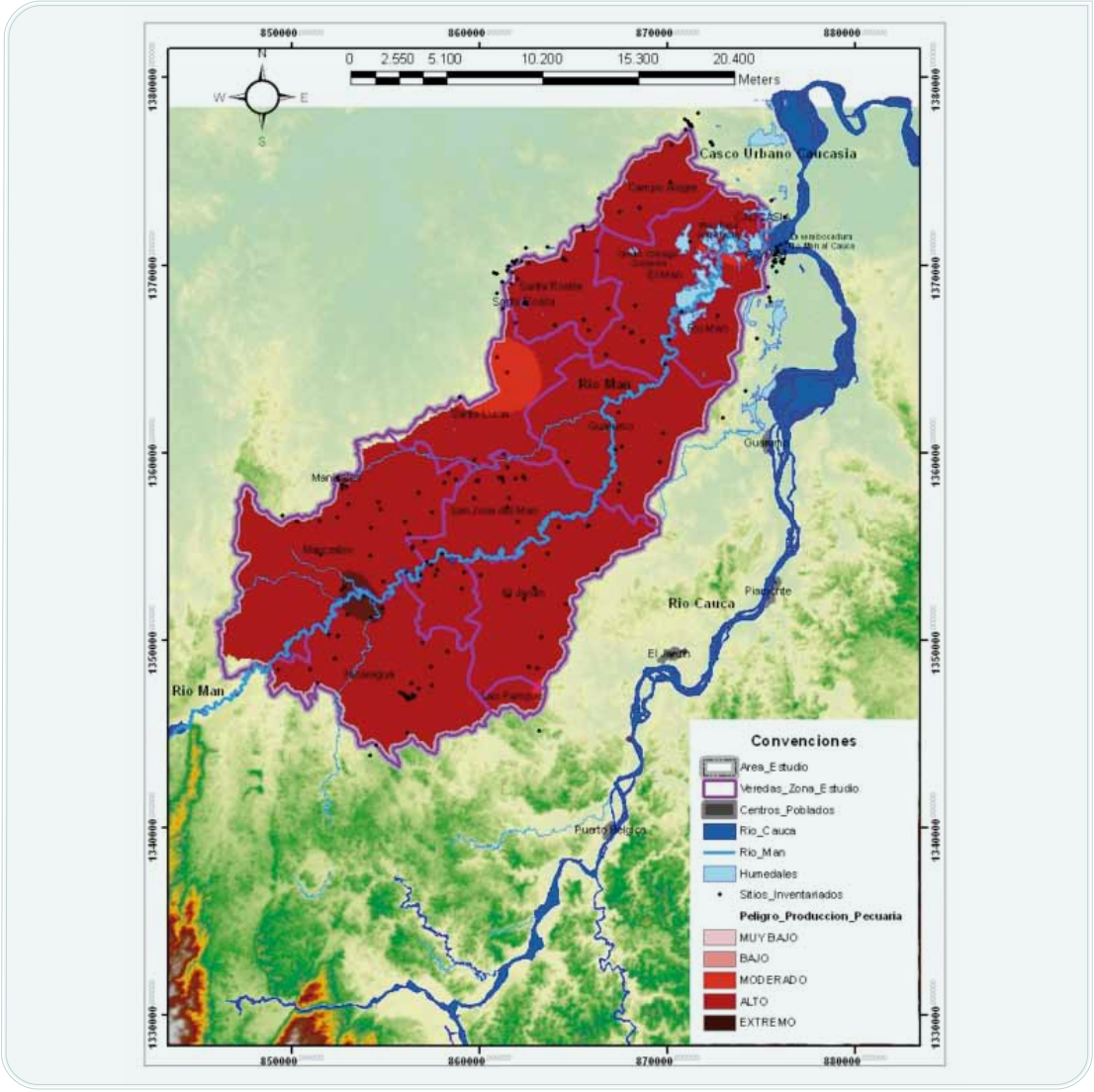


Figura 4-10 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por producción pecuaria

4.1.3.4. Peligro a la contaminación por extracción minera

Los puntos con índice potencial de carga contaminante elevado, se superponen a zonas de vulnerabilidad moderada, por lo tanto, la clase de peligro a la contaminación para esta relación es Alto. Las veredas con proporción de área con peligro alto son; Nicaragua, Manizales, San José del Man, Santa Lucía, Guarumo Río Man y El Man (3,3%). Las veredas Las Pampas, El Jardín, Santa Rosita y Campo Alegre, presentan peligro moderado (85,9%) y bajo (10,8%), asociados a la vulnerabilidad del medio físico establecida y a la ausencia de actividades potencialmente contaminantes producto de la extracción minera (Figura 4-11).

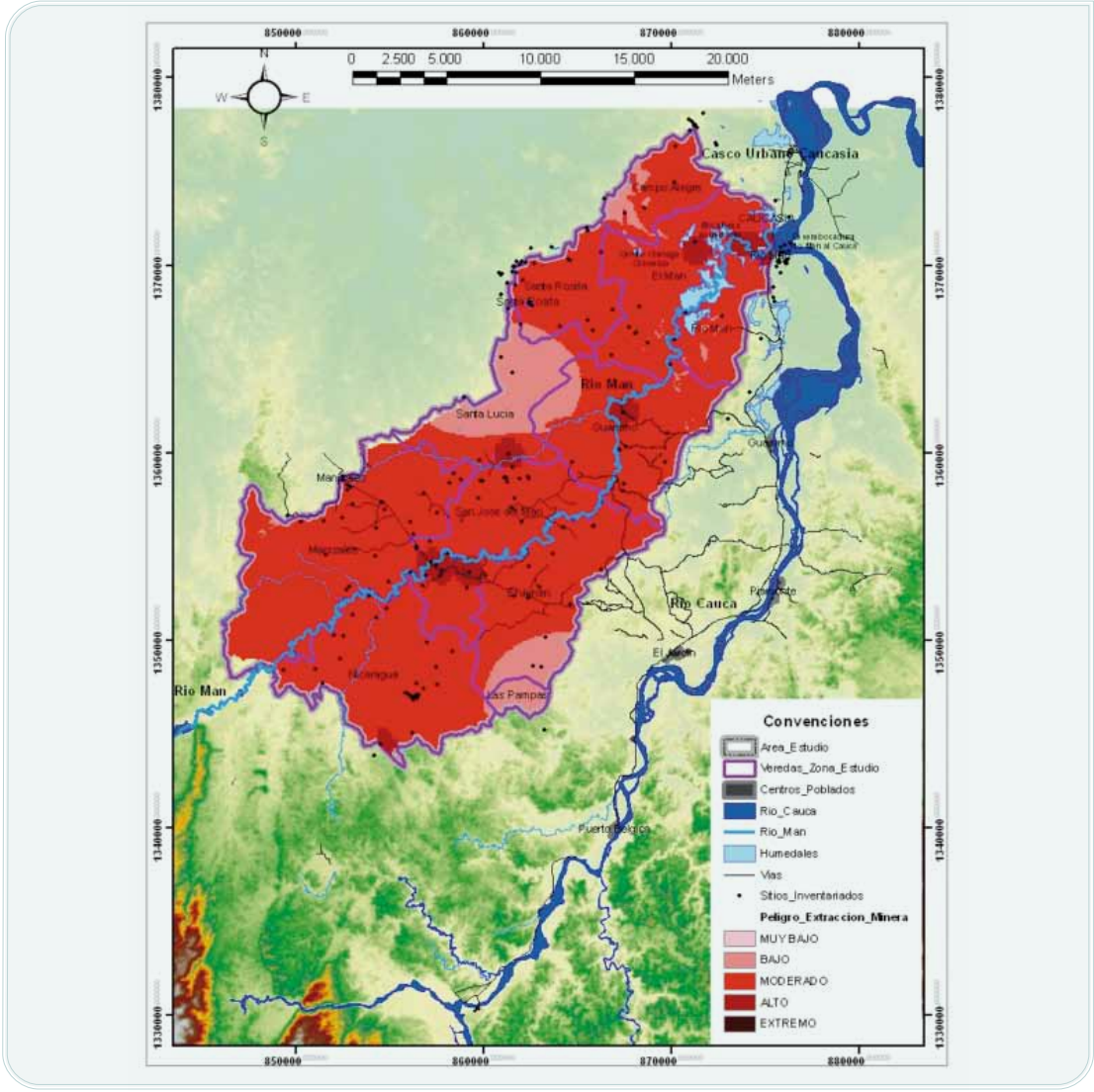


Figura 4-11 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por extracción minería

4.1.3.5. Peligro a la contaminación por accidentes ambientales

Para esta situación se presenta índice potencial de carga contaminante que varía de moderado a elevado (0,50 a 0,68). De acuerdo con la superposición de las subclases con índice potencial de carga contaminante moderado con el mapa de vulnerabilidad, coinciden en varias zonas de vulnerabilidad moderada, lo cual genera peligro a la contaminación moderado. Nicaragua, El Jardín, San José del Man, Santa Rosita y El Man, tienen zonas que concuerdan con esta descripción. Caso contrario sucede con las zonas de vulnerabilidad baja, para las cuales se superponen índices potenciales de carga contaminante elevados, lo que lleva a tener nuevamente zonas con peligro a la contaminación moderado. Esta particularidad se presenta en las veredas Santa Lucía y Río Man, y en conjunto con las anteriores se tiene una zona correspondiente al 66% con peligro a la contaminación moderado. También se presentan interacciones entre zonas de vulnerabilidad moderada con índices potenciales de carga contaminante

elevados, permitiendo obtener así, zonas de peligro a la contaminación alto, correspondiente al 34% de la zona de estudio. Esta situación se presenta a lado y lado del cauce principal del río Man, específicamente en las veredas Nicaragua, Manizales, El Jardín, San José del Man, Guarumo, Río Man, El Man y una parte de Campo Alegre, lo cual es acorde a la interacción que existe entre los cuerpos de agua superficial y las aguas subterránea. No se presentan zonas con peligro extremo. (Figura 4-12).

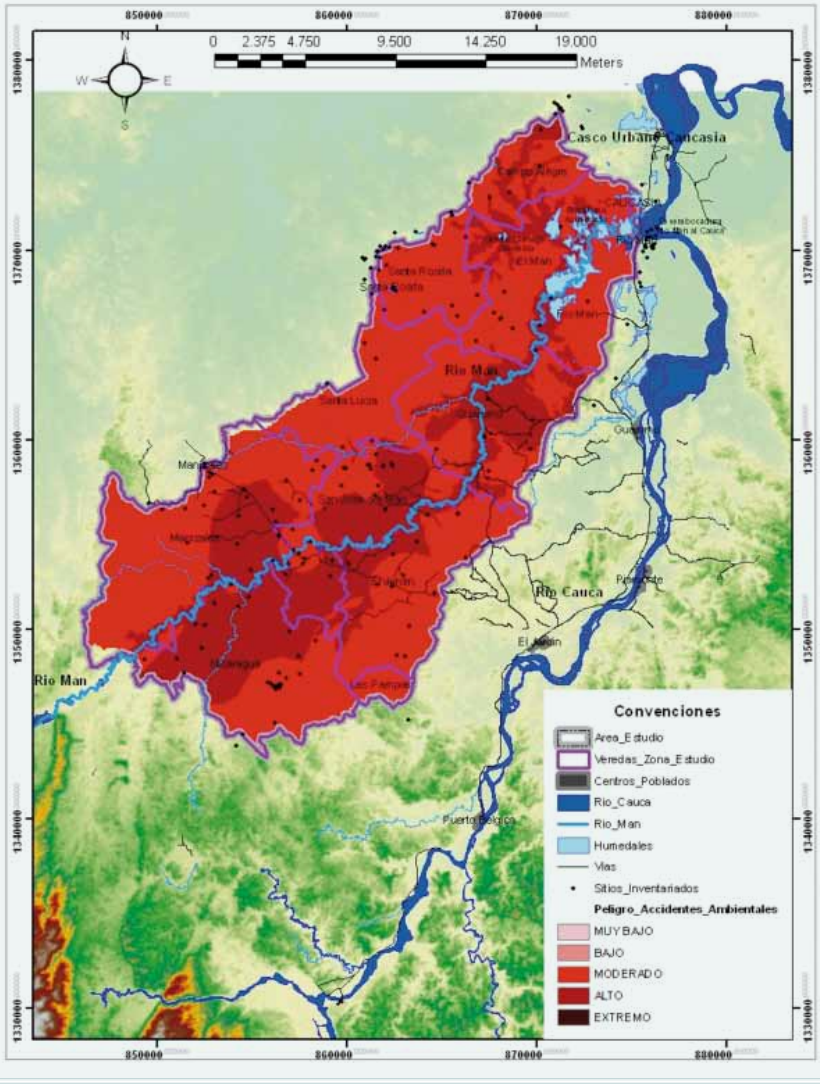


Figura 4-12 Peligro a la contaminación de las aguas subterráneas por accidentes ambientales

4.2. Determinación de la vulnerabilidad humana y sus componentes

Para la determinación de la vulnerabilidad humana y sus componentes se propuso una función que permitiera tener en cuenta variables de exposición y respuesta de una comunidad ante un evento de peligro. Estas variables de exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia fueron ordenadas y clasificadas de manera que mediante la utilización de una relación matemática se obtuvieran los índices para cada componente de la vulnerabilidad humana. En primera instancia y una vez definidos los componentes se procedió a jerarquizarlas para poder establecer un coeficiente de importancia, con relación al producto final, que en éste caso es el índice de vulnerabilidad humana (Función 3.3).

4.2.1. Exposición a la contaminación

En la Tabla 4-2 se sintetiza para el área de estudio la información que permite calcular la densidad poblacional por vereda y de acuerdo con ésta, calificar el valor y la clase de exposición de la población en relación con un posible evento de contaminación del agua subterránea a partir de la cual se abastece. Los rangos de densidad poblacional son establecidos (numeral 3.1.2.1) a partir de los datos de recarga reportados en los cálculos de balance hídrico realizados por Universidad de Antioquia y Corantioquia (2003 y 2004) y por Santa (2009), las densidades máximas de viviendas establecidas por Corantioquia (2007) y los datos de población.

Como se observa el máximo valor que se presenta en la densidad poblacional es la obtenida para el corregimiento de El Jardín, (72 hab/km^2) y el valor más bajo es el presentado en la vereda de Nicaragua, (3.6 hab/km^2). Después de obtener la clase según la densidad poblacional, se procede a asignar el valor relativo a cada clase y se multiplica por el coeficiente de importancia para el componente exposición (0,45).

Nombre	Cantidad Personas	Área (km^2)	Densidad (Hab/ km^2)	Calificación Exposición	Valor Relativo
Santa Rosita	759	33,5	22,7	BAJA	0,4
Campo Alegre	962	57,5	16,7	BAJA	0,4
El Man	716	47,5	15,1	BAJA	0,4
El Jardín	7.966	110,6	72,0	MODERADA	0,6
Guarumo	3.171	82,5	38,4	BAJA	0,4
Manizales	565	91,8	6,2	MUYBAJA	0,2
San José del Man	671	44,5	15,1	BAJA	0,4
Río Man	450	40,2	11,2	BAJA	0,4
Las Pampas	246	22,1	11,1	BAJA	0,4
Santa Lucia	428	39,9	10,7	BAJA	0,4
Nicaragua	249	68,6	3,6	MUYBAJA	0,2
Total	16.183	638,8	25,3	BAJA	0,4
Promedio	1.471	58,1	20,3	BAJA	0,4
Máximo	7.966	110,6	72,0	MODERADA	0,6
Mínimo	246	22,1	3,6	MUYBAJA	0,2

Tabla 4-2 Población, área y densidad poblacional por unidad de análisis

El 32% del área de estudio tiene una exposición muy baja (Nicaragua y Manizales), con exposición baja se encuentra el 56% del territorio (Las Pampas, San José del Man, Santa Lucía, Guarumo, Santa Rosita, El Man, Río Man y Campo Alegre) y finalmente en exposición moderada se encuentra en el 11% del área (El Jardín) (Figura 4-13).

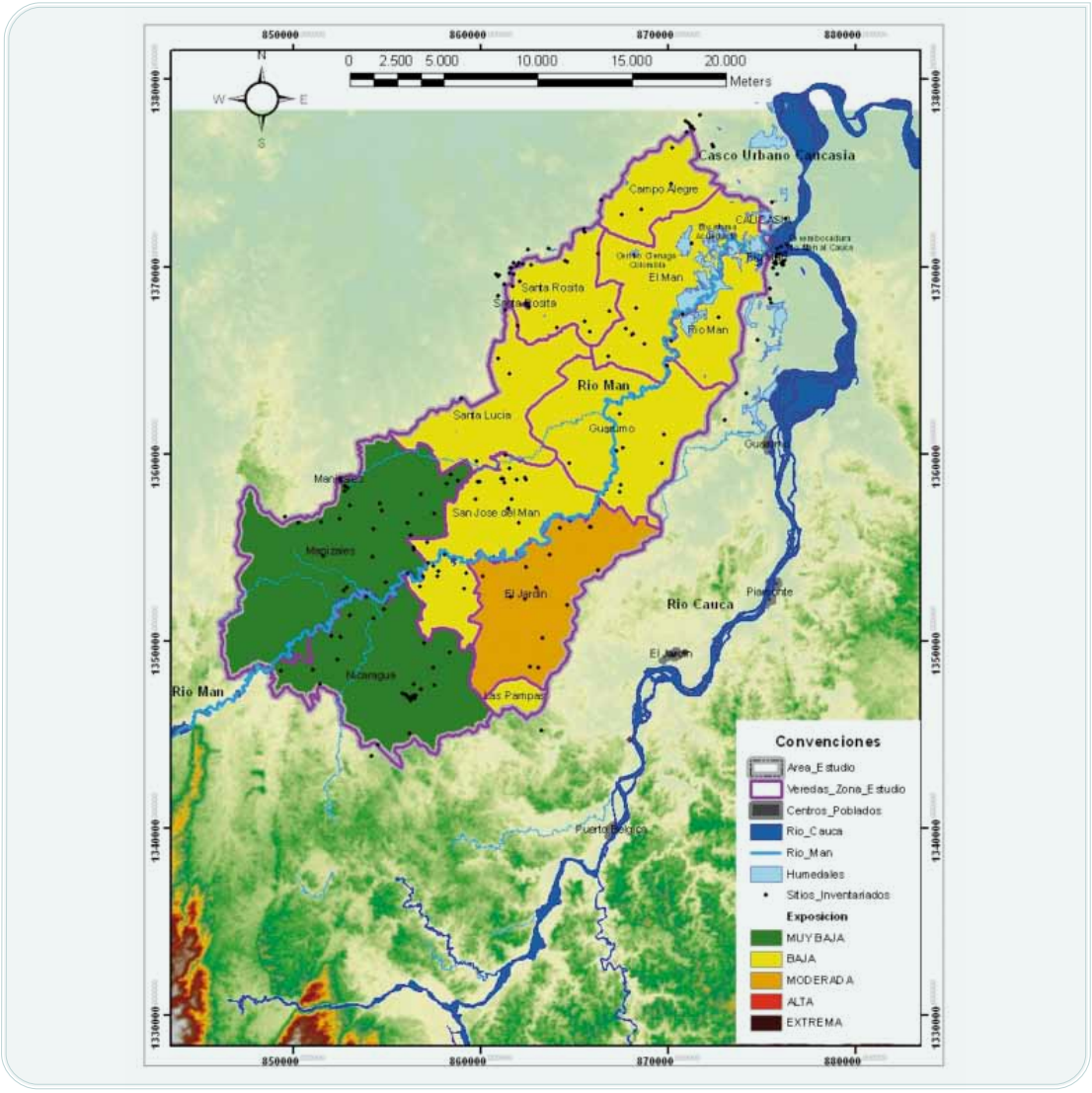


Figura 4-13 Mapa de exposición

4.2.2. Fragilidad socioeconómica (FSE)

Se presentan los resultados de los análisis realizados sobre la información correspondiente a las variables cobertura en servicio de acueducto, nivel de educación, nivel de ingresos, cobertura de atención en salud y cultura, importancia y manejo del recurso hídrico con influencia ancestral, que permite luego evaluar para las veredas ubicadas en la zona de estudio la fragilidad socioeconómica que hace parte de la determinación de la vulnerabilidad humana.

4.2.2.1 Cobertura en servicio de acueducto

En esta variable se identifica el porcentaje de la población asentada en cada vereda sin cobertura en el servicio de acueducto (Tabla 4-3). Las veredas que presentan la situación extrema son Nicaragua, Santa Lucía y Las Pampas, en las cuales la cobertura en el servicio de acueducto no alcanza el 5%. Esta situación se presenta en el 23% de la zona de estudio. Las que presentan una clase moderada, 50% del territorio, son Santa Rosita, El Man, El Jardín, Guarumo y San José del Man donde la cobertura alcanza el 40%. Las veredas Manizales y Río Man (23%), presentan una situación Baja y Campo Alegre (4%) muy baja superando el 60% de cobertura en el servicio.

Corregimiento/Vereda	Sin Cobertura (%)	Clase Acueducto	Valor Relativo
Santa Rosita	55,60	MODERADA	0,6
Campo Alegre	17,78	MUYBAJA	0,2
El Man	58,15	MODERADA	0,6
El Jardín	53,90	MODERADA	0,6
Guarumo	41,19	MODERADA	0,6
Manizales	36,28	BAJA	0,4
San José del Man	58,15	MODERADA	0,6
Río Man	22,67	BAJA	0,4
Las Pampas	95,93	EXTREMA	1
Santa Lucía	100,00	EXTREMA	1
Nicaragua	100,00	EXTREMA	1

Tabla 4-3. Resultados de la variable cobertura en acueducto

4.2.2.2. Nivel de educación

En esta variable se destaca aquella población mayor de 11 años que no tiene ningún grado de estudio o que tiene la primaria incompleta (Tabla 4-4). El porcentaje de analfabetismo en la zona rural de los municipios de Cáceres (30,6%) y Caucasia (10,2%) son de los más altos en el Departamento de Antioquia (Gobernación de Antioquia, 2009). En esta variable se presentan solamente clasificaciones extremas a altas, lo que indica que más del 40% de la población objeto de análisis en esta zona de estudio no ha terminado los estudios de primaria o no ha realizado ningún grado de educación formal. El 39% de la zona de estudio presenta clase extrema, localizada específicamente en las veredas de Santa Rosita, Guarumo, Santa Lucía y Nicaragua, es decir más del 60% de las personas mayores de 11 años tienen la primaria incompleta o no tienen ningún grado de estudio formal. Las veredas de Campo Alegre, El Man, El Jardín, Manizales, San José del Man, Río Man y Las Pampas presentan una categoría alta, correspondiente al 61% restante del área de estudio.

Corregimiento/Vereda	Ningún grado o Primaria incompleta (%)	Clase Educación	Valor Relativo
Santa Rosita	61,36	EXTREMA	1
Campo Alegre	56,21	ALTA	0,8
El Man	59,94	ALTA	0,8
El Jardín	56,34	ALTA	0,8
Guarumo	61,91	EXTREMA	1
Manizales	56,25	ALTA	0,8
San José del Man	59,94	ALTA	0,8
Río Man	57,85	ALTA	0,8
Las Pampas	57,30	ALTA	0,8
Santa Lucía	64,13	EXTREMA	1
Nicaragua	68,11	EXTREMA	1

Tabla 4-4 Resultados de la variable nivel de educación

4.2.2.3. Nivel de ingresos

Se estima el porcentaje de jefes de hogar con ingresos inferiores a un salario mínimo mensual legal vigente (Tabla 4-5). En la zona de estudio más del 70% de la población objeto del análisis devenga un salario inferior al mínimo mensual legal vigente en Colombia. En la zona de acuerdo con la información que suministra la Gobernación de Antioquia (2009), aproximadamente el 40% de la población trabaja de manera independiente y un 30% es empleado, y los demás son trabajadores sin ningún tipo de remuneración económica. Adicionalmente, una de las razones identificadas para que las personas no asistan al médico o a un centro de atención en salud es la falta de recursos económicos para el desplazamiento y para el tratamiento en caso de requerirse. El 85% del territorio presenta clase extrema, exceptuando las veredas, Las Pampas y Nicaragua que presenta una categoría alta, correspondiente al 15% de la zona de estudio.

Corregimiento/Vereda	Jefes de hogar con ingresos inferior al mínimo (%)	Clase Ingresos	Valor Relativo
Santa Rosita	93,45	EXTREMA	1
Campo Alegre	84,41	EXTREMA	1
El Man	86,41	EXTREMA	1
El Jardín	87,21	EXTREMA	1
Guarumo	95,17	EXTREMA	1
Manizales	86,21	EXTREMA	1
San José del Man	86,41	EXTREMA	1
Río Man	93,58	EXTREMA	1
Las Pampas	79,25	ALTA	0,8
Santa Lucía	84,62	EXTREMA	1
Nicaragua	73,77	ALTA	0,8

Tabla 4-5 Resultados de la variable nivel de ingresos

4.2.2.4. Cobertura de atención en salud

Según datos de Antioquia en cifras (2009), la cobertura en afiliación a la seguridad social en salud en Cáceres a nivel rural es del 72,6% y en Caucasia del 79,8%, por lo tanto el 100% de las veredas tienen una clase baja para esta variable (Tabla 4-6).

Corregimiento/Vereda	Población sin cobertura en salud	Clase salud	Valor relativo
Santa Rosita	27,40	BAJA	0,4
Campo Alegre	27,40	BAJA	0,4
El Man	27,40	BAJA	0,4
El Jardín	20,20	BAJA	0,4
Guarumo	20,20	BAJA	0,4
Manizales	20,20	BAJA	0,4
San José del Man	20,20	BAJA	0,4
Río Man	20,20	BAJA	0,4
Las Pampas	20,20	BAJA	0,4
Santa Lucía	20,20	BAJA	0,4
Nicaragua	20,20	BAJA	0,4

Tabla 4-6 Resultados de la variable población sin cobertura en salud

4.2.2.5. Cultura ancestral

En términos culturales se estima para el 100% de la zona de estudio una clase moderada: hay presencia de algunas personas pertenecientes a etnias que pueden orientar al resto de la comunidad hacia un buen manejo y a la conservación y protección de los recursos naturales, específicamente del recurso hídrico, y adicionalmente han llevado sus vidas con una dependencia directa del recurso hídrico; primero por ser la fuente de abastecimiento para el consumo doméstico diario, segundo por tener gran influencia en la economía de la región (pesca, producción agropecuaria y minería) y por convertirse en una fuente de comunicación y transporte con otros sitios de la región y el país. Sin embargo, es evidente que muchas de las zonas del área de estudio ya están intervenidas drásticamente por nuevas costumbres y formas de vida que alteran el funcionamiento natural del ecosistema (Tabla 4-7).

Corregimiento/Vereda	Clase Cultural	Valor Relativo
Santa Rosita	MODERADA	0,6
Campo Alegre	MODERADA	0,6
El Man	MODERADA	0,6
El Jardín	MODERADA	0,6
Guarumo	MODERADA	0,6
Manizales	MODERADA	0,6
San José del Man	MODERADA	0,6
Río Man	MODERADA	0,6
Las Pampas	MODERADA	0,6
Santa Lucía	MODERADA	0,6
Nicaragua	MODERADA	0,6

Tabla 4-7 Resultados de la variable cultural, manejo e importancia del agua

4.2.2.6. Fragilidad Socioeconómica

Finalmente y de acuerdo con la función 3.1, se presentan los resultados de integrar las variables de la fragilidad socioeconómica ante un peligro de contaminación de las aguas subterráneas (Tabla 4-8). En la zona de estudio se determinaron dos clases de fragilidad socioeconómica, moderada y alta. Para el caso más crítico, se tiene un 95% del área de estudio, correspondiente a las veredas Santa Lucía, Santa Rosita, El Man, El Jardín, Guarumo, Manizales, San José del Man, Río Man, Las Pampas y Nicaragua. Finalmente se obtiene una vereda con fragilidad socioeconómica moderada, Campo Alegre con un porcentaje del área de estudio equivalente al 5%. (Figura 4-14).

Corregimiento/Vereda	VR1	VR2	VR3	VR4	VR5	SUMA	FSE	CLASE
Santa Rosita	0,60	1,00	1,00	0,40	0,60	3,60	0,72	ALTA
Campo Alegre	0,20	0,80	1,00	0,40	0,60	3,00	0,60	MODERADA
El Man	0,60	0,80	1,00	0,40	0,60	3,40	0,68	ALTA
El Jardín	0,60	0,80	1,00	0,40	0,60	3,40	0,68	ALTA
Guarumo	0,60	1,00	1,00	0,40	0,60	3,60	0,72	ALTA
Manizales	0,40	0,80	1,00	0,40	0,60	3,20	0,64	ALTA
San José del Man	0,60	0,80	1,00	0,40	0,60	3,40	0,68	ALTA
Río Man	0,40	0,80	1,00	0,40	0,60	3,20	0,64	ALTA
Las Pampas	1,00	0,80	0,80	0,40	0,60	3,60	0,72	ALTA
Santa Lucía	1,00	1,00	1,00	0,40	0,60	4,00	0,80	ALTA
Nicaragua	1,00	1,00	0,80	0,40	0,60	3,80	0,76	ALTA

Tabla 4-8 Resultados de la componente fragilidad socioeconómica

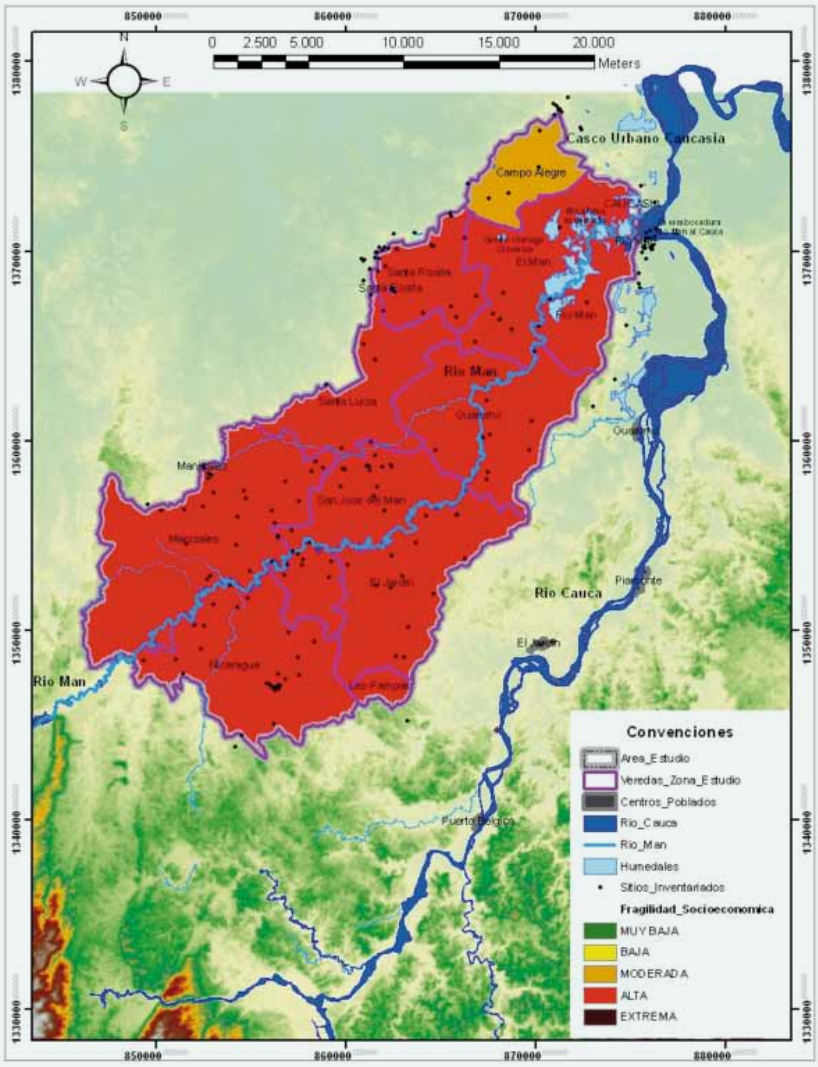


Figura 4-14 Mapa de fragilidad socioeconómica

4.2.3. Falta de resiliencia (FR)

Se presentan en este numeral los resultados correspondientes al análisis de la información de cada una de las variables que la definen.

4.2.3.1. Programas de ordenación territorial y saneamiento

En la zona de estudio, los municipios de Caucasia y Cáceres cuentan con planes de desarrollo, de ordenamiento territorial, de gestión integral de residuos sólidos, planes maestros de acueducto y alcantarillado, planes de saneamiento y manejo de vertimientos y la cuenca del río Man tiene formulado un plan de ordenación y manejo, por lo tanto para la variable de programas de ordenación territorial y saneamiento, se establece una categoría baja en el 100% del área de estudio (Tabla 4-9).

Corregimiento/Vereda	Planes	Clase	Valor Relativo
Santa Rosita	0,40	BAJA	0,4
Campo Alegre	0,40	BAJA	0,4
El Man	0,40	BAJA	0,4
El Jardín	0,40	BAJA	0,4
Guarumo	0,40	BAJA	0,4
Manizales	0,40	BAJA	0,4
San José del Man	0,40	BAJA	0,4
Río Man	0,40	BAJA	0,4
Las Pampas	0,40	BAJA	0,4
Santa Lucía	0,40	BAJA	0,4
Nicaragua	0,40	BAJA	0,4

Tabla 4-9 Resultados de la variable programas de ordenamiento territorial y saneamiento

4.2.3.2. Programas de educación ambiental

Frente a la existencia de los programas de educación ambiental se identificó la necesidad de los municipios en priorizar este tipo de actividades durante la ejecución del plan de gobierno. Igualmente se tiene en las escuelas e instituciones de la zona incluido en el plan de estudios el componente ambiental, por tal razón se propone para la zona una clase moderada (Tabla 4-10).

Corregimiento/Vereda	Programas Educación Ambiental	Clase	Valor relativo
Santa Rosita	0,60	MODERADA	0,6
Campo Alegre	0,60	MODERADA	0,6
El Man	0,60	MODERADA	0,6
El Jardín	0,60	MODERADA	0,6
Guarumo	0,60	MODERADA	0,6
Manizales	0,60	MODERADA	0,6
San José del Man	0,60	MODERADA	0,6
Río Man	0,60	MODERADA	0,6
Las Pampas	0,60	MODERADA	0,6
Santa Lucía	0,60	MODERADA	0,6
Nicaragua	0,60	MODERADA	0,6

Tabla 4-10 Resultados de la variable programas de educación ambiental

4.2.3.3. Programas de prevención y atención de emergencias, relacionadas con la contaminación del recurso hídrico subterráneo

En esta variable se encontró que no se tiene proyectado aún la estructuración de un plan de prevención y atención de situaciones relacionadas con los peligros de contaminación de las aguas subterráneas, por lo tanto se asigna como clasificación para esta variable la categoría extrema en el 100% del área de estudio (Tabla 4-11).

Corregimiento/Vereda	Programas Prevención y Atención	Clase	Valor Relativo
Santa Rosita	1,00	EXTREMA	1
Campo Alegre	1,00	EXTREMA	1
El Man	1,00	EXTREMA	1
El Jardín	1,00	EXTREMA	1
Guarumo	1,00	EXTREMA	1
Manizales	1,00	EXTREMA	1
San José del Man	1,00	EXTREMA	1

Corregimiento/Vereda	Programas Prevención y Atención	Clase	Valor Relativo
Río Man	1,00	EXTREMA	1
Las Pampas	1,00	EXTREMA	1
Santa Lucía	1,00	EXTREMA	1
Nicaragua	1,00	EXTREMA	1

Tabla 4-11 Resultados de la variable programas de prevención y atención de emergencias

4.2.3.4. Existencia de fuentes de abastecimiento alternas

Con relación a la existencia de fuentes alternas de abastecimiento, se definieron diferentes clases según el estado, la operación y la administración de las mismas (Tabla 4-12). Aquellas unidades espaciales de análisis donde no se identificó ninguna fuente alterna existente se clasificó como categoría extrema, representando el 9% del territorio e involucra las veredas Las Pampas y Santa Lucía. La siguiente clasificación corresponde a la categoría alta, con un porcentaje del área de estudio equivalente al 23,5% y se determinó en las veredas San José del Man y Nicaragua. La categoría de moderada se presenta en el 26,5% del territorio, en las veredas Campo Alegre, El Man y El Jardín. Como categoría baja se tiene el 22% de la zona de estudio y se ubica en las veredas Santa Rosita, Guarumo y Río Man. Finalmente se determinó como categoría muy baja a Manizales por tener fuente alterna de abastecimiento construida, operada y administrada (19%).

Corregimiento/Vereda	Fuentes Alternas	Clase	Valor Relativo
Santa Rosita	0,40	BAJA	0,4
Campo Alegre	0,60	MODERADA	0,6
El Man	0,60	MODERADA	0,6
El Jardín	0,60	MODERADA	0,6
Guarumo	0,40	BAJA	0,4
Manizales	0,20	MUYBAJA	0,2
San José del Man	0,80	ALTA	0,8
Río Man	0,40	BAJA	0,4
Las Pampas	1,00	EXTREMA	1
Santa Lucía	1,00	EXTREMA	1
Nicaragua	0,80	ALTA	0,8

Tabla 4-12 Resultados de la variable fuentes de abastecimiento alternas

4.2.3.5. Existencia de organizaciones sociales

La presencia de organizaciones sociales es determinante para jalonar los proyectos y programas que orienten el desarrollo de la zona, igualmente se convierten en el puente y vía de comunicación entre la comunidad y los entes administrativos. De acuerdo con la presencia o no de organizaciones sociales que cumplan con este propósito para la zona de estudio (Tabla 4-13), se obtuvo: clase moderada en el 24,5% del territorio, en las veredas San José del Man, Las Pampas y Nicaragua; la clasificación de baja se tiene identificada en el 40,5% del área de estudio, correspondiente a las veredas Santa Rosita, El Man, Guarumo, Río Man y Santa Lucía, debido a la presencia de juntas de acción comunal consolidadas y finalmente se establece la categoría de muy baja al 35% de la zona, específicamente en las veredas Campo Alegre, El Jardín y Manizales por tener juntas administradoras del servicio de acueducto veredal.

Corregimiento/Vereda	Organización Social	Clase	Valor Relativo
Santa Rosita	0,40	BAJA	0,4
Campo Alegre	0,20	MUYBAJA	0,2
El Man	0,40	BAJA	0,4
El Jardín	0,20	MUYBAJA	0,2
Guarumo	0,40	BAJA	0,4
Manizales	0,20	MUYBAJA	0,2
San José del Man	0,60	MODERADA	0,6
Río Man	0,40	BAJA	0,4
Las Pampas	0,60	MODERADA	0,6
Santa Lucía	0,40	BAJA	0,4
Nicaragua	0,60	MODERADA	0,6

Tabla 4-13 Resultados de la variable organizaciones sociales

4.2.3.6. Falta de Resiliencia

Con la determinación de cada variable, se tienen todos los elementos necesarios para aplicar la función 3.2, que integra las mismas y permite obtener para el área de estudio un cálculo de la falta de resiliencia de la comunidad si se presentase un evento asociado al peligro de contaminación de las aguas subterráneas. Se determinan dos clases de falta de resiliencia, Alta y Moderada (Tabla 4-14). La categoría alta se presenta en el 33% del territorio y se ubica específicamente en las veredas San José del Man, Las Pampas, Santa Lucía y Nicaragua, el 67% restante del área se clasifica como moderada y son las veredas Santa Rosita, Campo Alegre, El Jardín, Guarumo, Manizales, El Man y Río Man (Figura 4-15).

Corregimiento/Vereda	VR1	VR2	VR3	VR4	VR5	SUMA	FR	CLASE
Santa Rosita	0,40	0,60	1,00	0,40	0,40	2,80	0,56	MODERADA
Campo Alegre	0,40	0,60	1,00	0,60	0,20	2,80	0,56	MODERADA
El Man	0,40	0,60	1,00	0,60	0,40	3,00	0,60	MODERADA
El Jardín	0,40	0,60	1,00	0,60	0,20	2,80	0,56	MODERADA
Guarumo	0,40	0,60	1,00	0,40	0,40	2,80	0,56	MODERADA
Manizales	0,40	0,60	1,00	0,20	0,20	2,40	0,48	MODERADA
San José del Man	0,40	0,60	1,00	0,80	0,60	3,40	0,68	ALTA
Río Man	0,40	0,60	1,00	0,40	0,40	2,80	0,56	MODERADA
Las Pampas	0,40	0,60	1,00	1,00	0,60	3,60	0,72	ALTA
Santa Lucía	0,40	0,60	1,00	1,00	0,40	3,40	0,68	ALTA
Nicaragua	0,40	0,60	1,00	0,80	0,60	3,40	0,68	ALTA

Tabla 4-14 Resultados de la falta de resiliencia

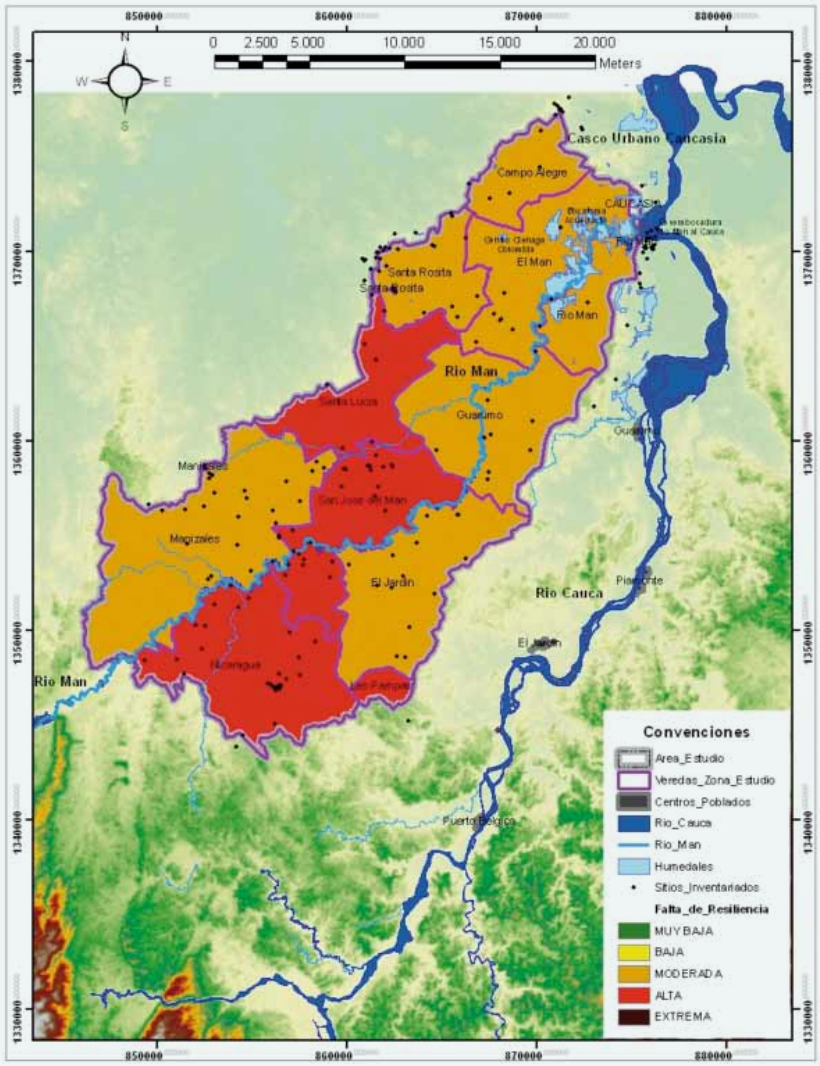


Figura 4-15 Mapa de falta de resiliencia

4.2.4. Vulnerabilidad humana

Para la evaluación de la vulnerabilidad humana en la zona de estudio se aplicó la expresión formulada en la metodología propuesta durante el desarrollo de este proyecto (Función 3.3). El 11% constituye una zona de alta vulnerabilidad humana correspondiente a la zona de El Jardín y con moderada vulnerabilidad humana se tiene el 89% del área de estudio restante (Tabla 4-15 y Figura 4-16).

Corregimiento/Vereda	EXP	FSE	FR	VH	CLASE_VH
Santa Rosita	0,40	0,72	0,56	0,54	MODERADA
Campo Alegre	0,40	0,60	0,56	0,50	MODERADA
El Man	0,40	0,68	0,60	0,54	MODERADA
El Jardín	0,60	0,68	0,56	0,62	ALTA
Guarumo	0,40	0,72	0,56	0,54	MODERADA
Manizales	0,20	0,64	0,48	0,41	MODERADA
San José del Man	0,40	0,68	0,68	0,55	MODERADA
Río Man	0,40	0,64	0,56	0,51	MODERADA
Las Pampas	0,40	0,72	0,72	0,58	MODERADA
Santa Lucía	0,40	0,80	0,68	0,59	MODERADA
Nicaragua	0,20	0,76	0,68	0,49	MODERADA

Tabla 4-15 Resultados de la vulnerabilidad humana según coeficientes de importancia

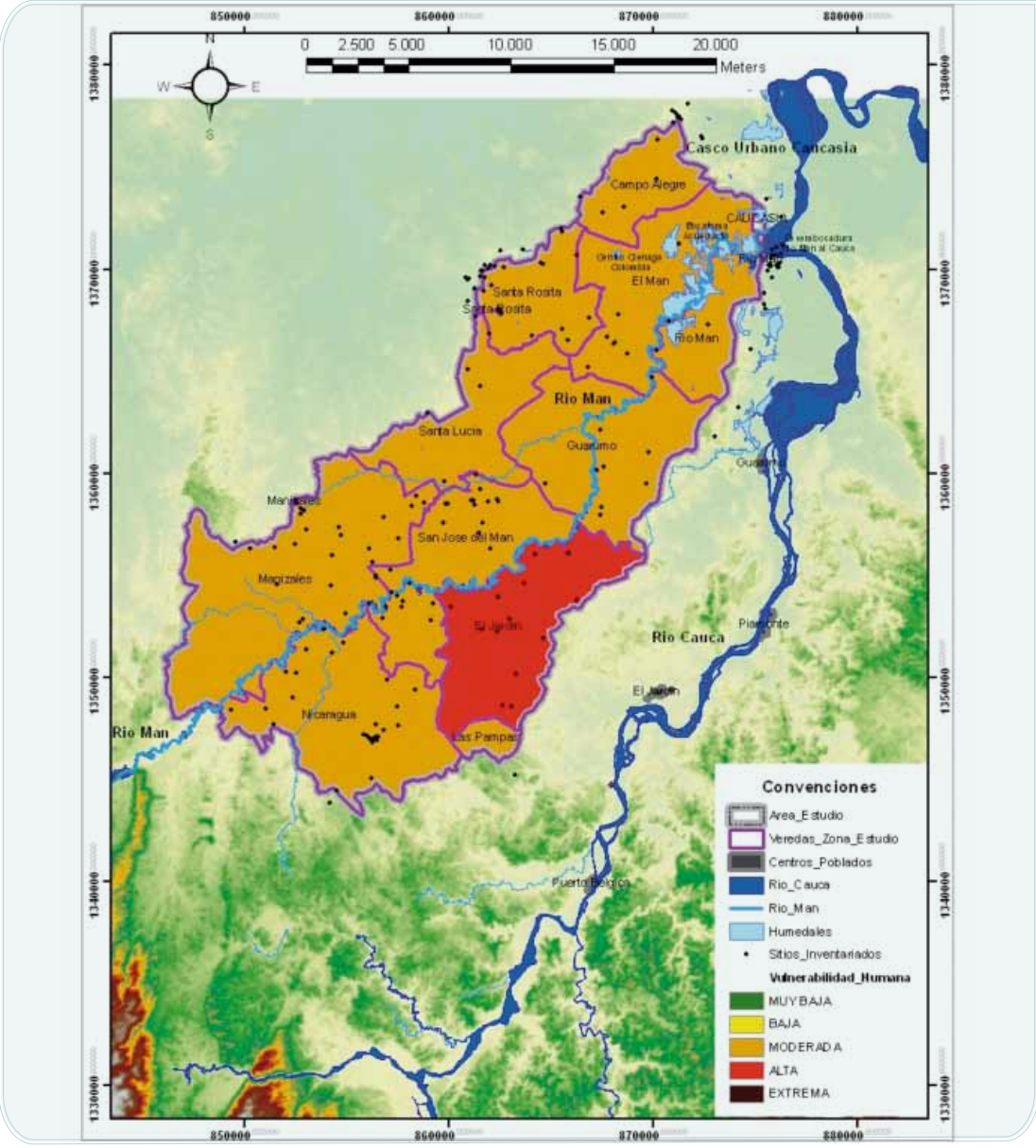


Figura 4-16 Mapa de vulnerabilidad humana

4.3. Determinación del riesgo a la contaminación

De acuerdo al planteamiento metodológico (Figura 3-1), la interacción entre el peligro a la contaminación de las aguas subterráneas y la vulnerabilidad humana de la población permite obtener el riesgo a la contaminación. A continuación se presentan los mapas de riesgo obtenidos a partir de las actividades principales que generan el peligro a la contaminación, desarrollo urbano, producción agrícola, pecuaria, extracción minera y los accidentes ambientales.

4.3.1. Riesgo a la contaminación por desarrollo urbano

En la zona de estudio se presentan dos categorías de riesgo que ocupan la mayor parte del territorio; riesgo extremo y alto. El riesgo extremo está identificado en el 11% de la zona de estudio, presentándose en gran parte de El Jardín. La clase de riesgo alto tiene el mayor porcentaje de cobertura con el 87% y se presenta en la totalidad de las veredas Nicaragua, Manizales, Las Pampas, San José del Man, Santa Rosita, El Man, Río Man y Campo Alegre. Igualmente se presenta en gran proporción en la vereda Guarumo y Santa Lucía. Con riesgo moderado y bajo se tiene un área de estudio del 2%, ubicada en las veredas Guarumo, Santa Lucía y El Jardín (Figura 4-17).

4.3.2. Riesgo a la contaminación por producción agrícola

Con respecto al riesgo asociado a la producción agrícola, se obtienen en el área de estudio tres (3) clases; extremo, alto y moderado. La clase de riesgo extremo, se presenta en el 10% del territorio cubriendo gran parte de El Jardín. Como riesgo alto se tiene la mayor parte del territorio (77%), presentándose en las veredas Nicaragua, Manizales, Santa Lucía, San José del Man, Santa Rosita, Guarumo, Campo Alegre, El Man y Río Man. La categoría de riesgo moderado se presenta en el 13% y es obtenido en la totalidad de la vereda Las Pampas, en buena parte de las veredas Santa Lucía, Guarumo y El Jardín y en algunas pequeñas áreas al interior de las veredas; Manizales, Nicaragua, Santa Rosita, Campo Alegre, El Man y Río Man. (Figura 4-18).

4.3.3. Riesgo a la contaminación por producción pecuaria

Se presentan tres clases de riesgo a la contaminación, extremo, alto y moderado. La categoría de riesgo extremo se presenta en el 11% del área de estudio, en gran parte de El Jardín. El mayor porcentaje del área de estudio, correspondiente al 86% presenta categoría de riesgo alto a la contaminación, presentándose específicamente en las veredas Manizales, Nicaragua, San José del Man, Guarumo, Santa Rosita, Campo Alegre y una porción de área de las veredas Santa Lucía, Las Pampas, El Jardín, El Man y Río Man. Por último, el riesgo moderado se presenta en un porción del territorio en la vereda Santa Lucía, Las Pampas y en un área compartida entre las veredas El Man y Río Man, equivalentes al 3% de la zona de estudio, cercano al sistema de humedales dependiente de las aguas subterráneas (Figura 4-19).

4.3.4. Riesgo a la contaminación por extracción minera

Las clases de riesgo asociadas a la actividad minera evaluadas en la zona son tres, riesgo a la contaminación extremo, alto y moderado. La clase de riesgo extremo se presenta en el 0,1% del territorio, en El Jardín. El riesgo alto se presenta en el 12,6% de la zona de estudio, en áreas al interior de las veredas Manizales, Nicaragua, San José

del Man, Guarumo, Santa Lucía, El Man, Río Man y El Jardín, destacando la última por tener gran parte del territorio en esta clase de riesgo. Por último, se presenta la mayor categoría de la zona, el riesgo moderado correspondiente al 87,3% del área de estudio, presentándose en todas las veredas objeto de análisis en el proyecto (Figura 4-20).

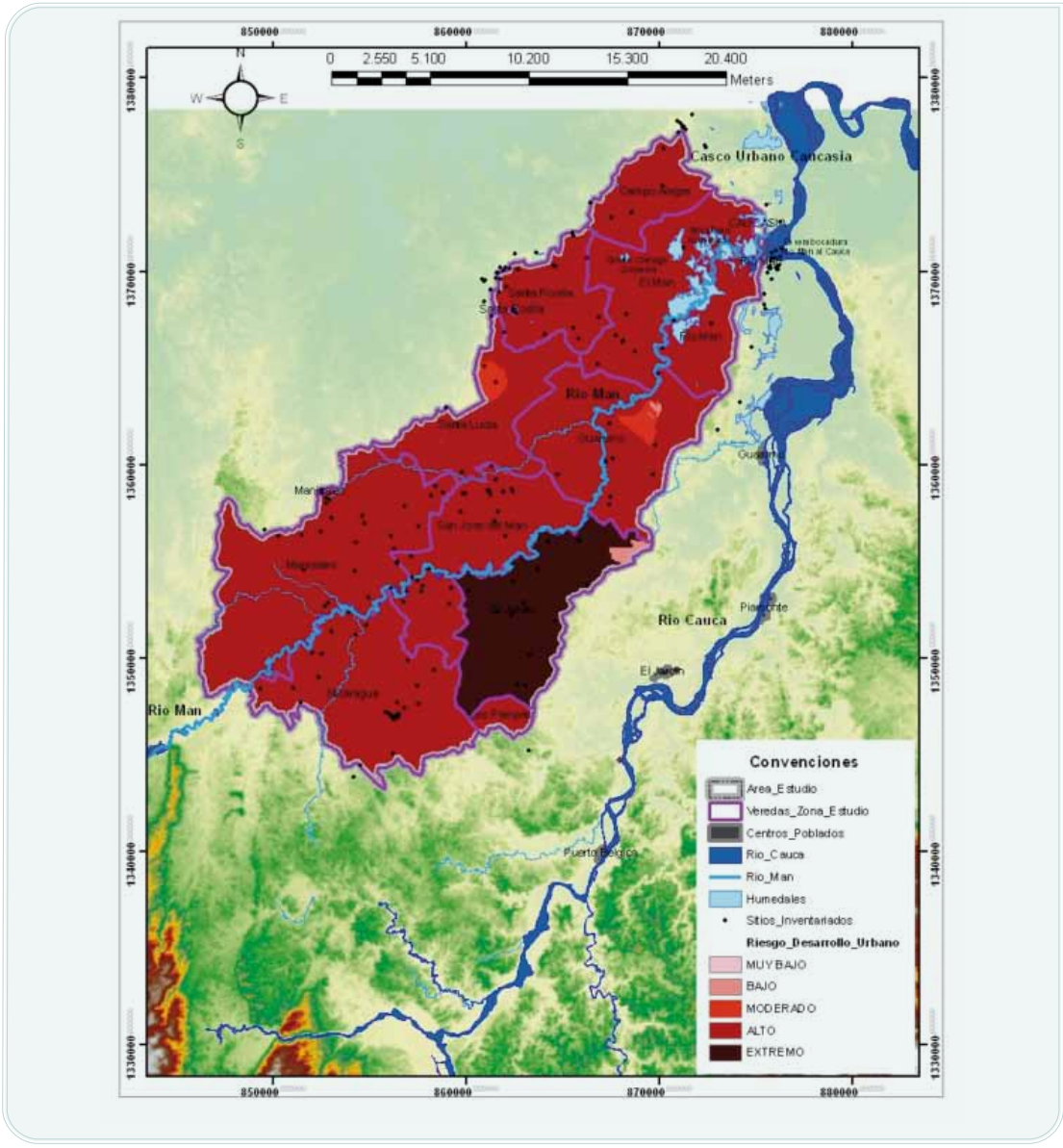


Figura 4-17 Mapa de riesgo a la contaminación por desarrollo urbano

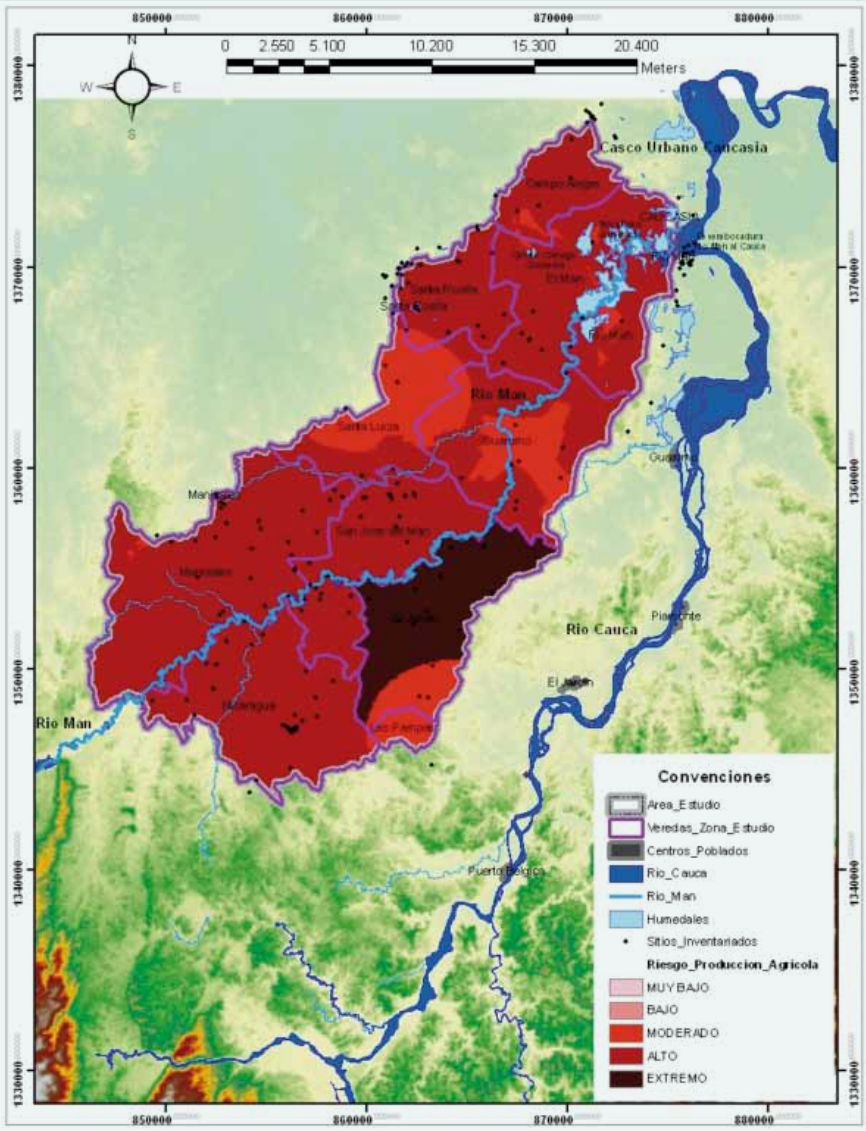


Figura 4-18 Mapa de Riesgo a la contaminación por producción agrícola

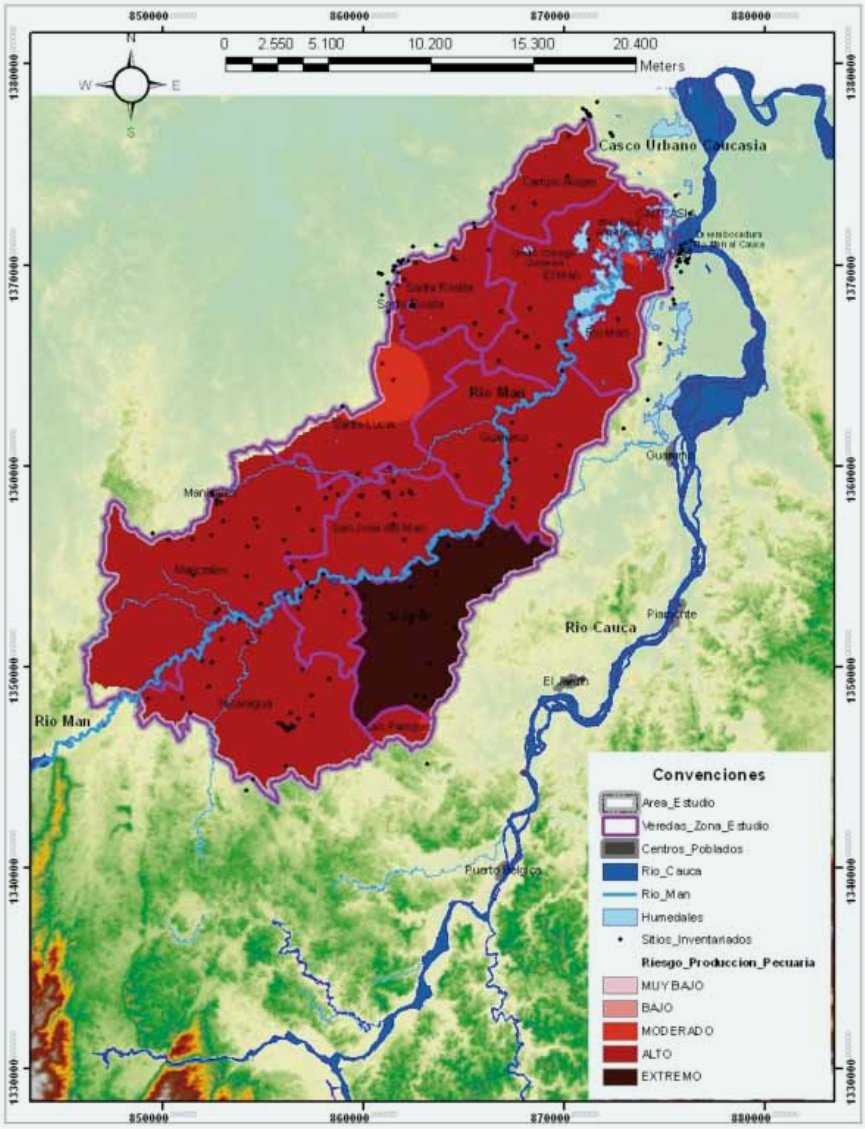


Figura 4-19 Mapa de riesgo a la contaminación por producción pecuaria

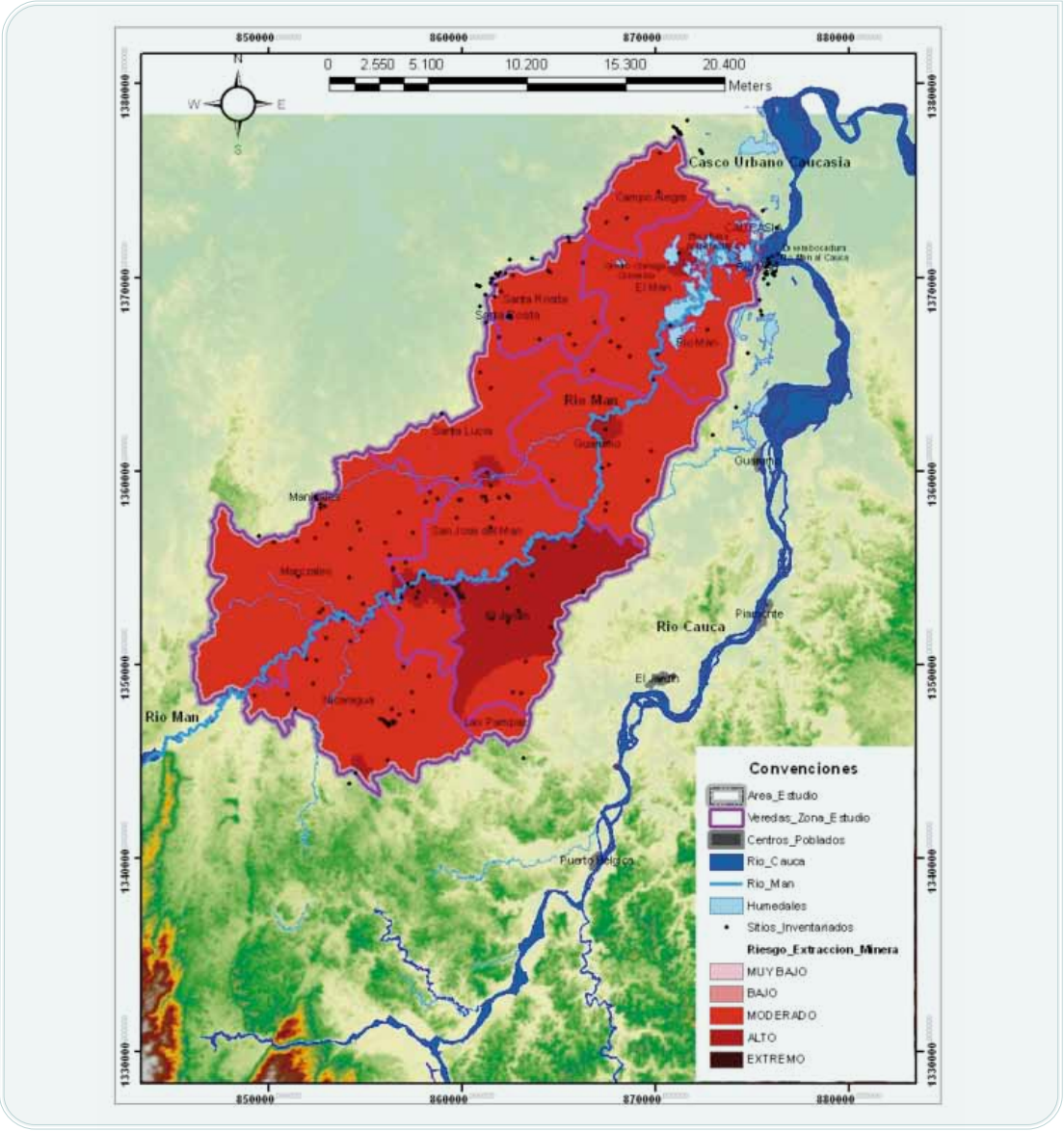


Figura 4-20 Mapa de riesgo a la contaminación por extracción minera

4.3.5. Riesgo a la contaminación por accidentes ambientales

La interacción entre los mapas de peligro por accidentes ambientales y vulnerabilidad humana, permiten obtener zonas de riesgo a la contaminación extremo, alto y moderado. La categoría de riesgo extremo se presenta en el 3% del área de estudio, específicamente en El Jardín. El 40% del territorio tiene riesgo alto a la contaminación y se presenta en todas las unidades de análisis del área de estudio, principalmente en las veredas El Jardín, Nicaragua, Manizales, Santa Lucía, Guarumo, San José del Man, Campo Alegre, El Man y Río Man. El 57% del área restante presenta riesgo moderado a la contaminación en las veredas Nicaragua, Manizales, San José del Man, Guarumo, Campo Alegre y en mayor proporción en las veredas Las Pampas, Santa Lucia, Santa Rosita, El Man y Río Man. (Figura 4-21).

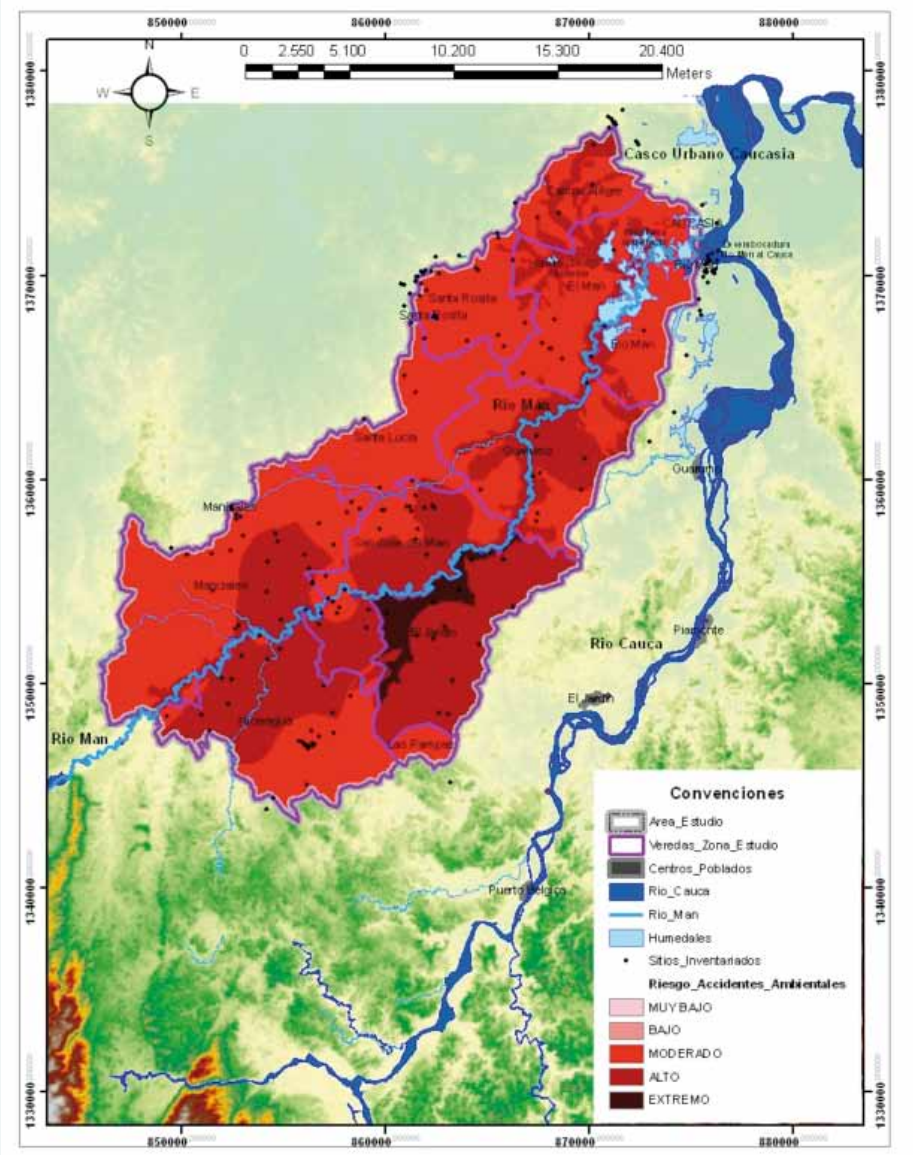


Figura 4-21 Mapa de riesgo por accidentes ambientales

4.4. Riesgo a la contaminación total

De acuerdo con los resultados obtenidos se cuenta hasta aquí con cinco mapas de riesgo a la contaminación, uno por cada actividad contaminante principal. Con el fin de sintetizar los resultados y brindar a los entes encargados de la protección de la calidad del agua y la salud de la población, tres panoramas sobre los cuales pueden priorizar y establecer las acciones pertinentes para enfrentar el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, se presentan a continuación tres propuestas de mapas de riesgo total: riesgo crítico, promedio y prevalente.

4.4.1. Riesgo crítico

En primer lugar se presenta un mapa de riesgo asociado a la condición crítica de las categorías, resultado de la combinación de los mapas de actividades y en el caso de zonas con diferentes clases de riesgo, se escoge el mayor.

En el primer caso presentado en la Figura 4-22, para una zona en común el riesgo asociado al desarrollo urbano es alto, a la producción agrícola es alto, a la producción pecuaria es alto, a la extracción minera es moderado y a los accidentes ambientales es alto, por lo tanto y de acuerdo con lo planteado, en esta zona de análisis el riesgo total es el más elevado. De igual forma se analizan las demás relaciones, obteniendo dos clases de riesgo a la contaminación para el 99% del área de estudio; extremo y alto. El primero se presenta en el 11% de la zona de estudio, en la totalidad de El Jardín. La categoría de riesgo alto se presenta en el 88% del territorio, en la totalidad de las veredas Nicaragua, Las Pampas, San José del Man, Guarumo, Santa Rosita, Campo Alegre, Río Man y El Man y en gran parte del territorio de Manizales y Santa Lucía. En estas últimas dos también se presenta riesgo moderado, lo cual representa el 1% de la zona de estudio.

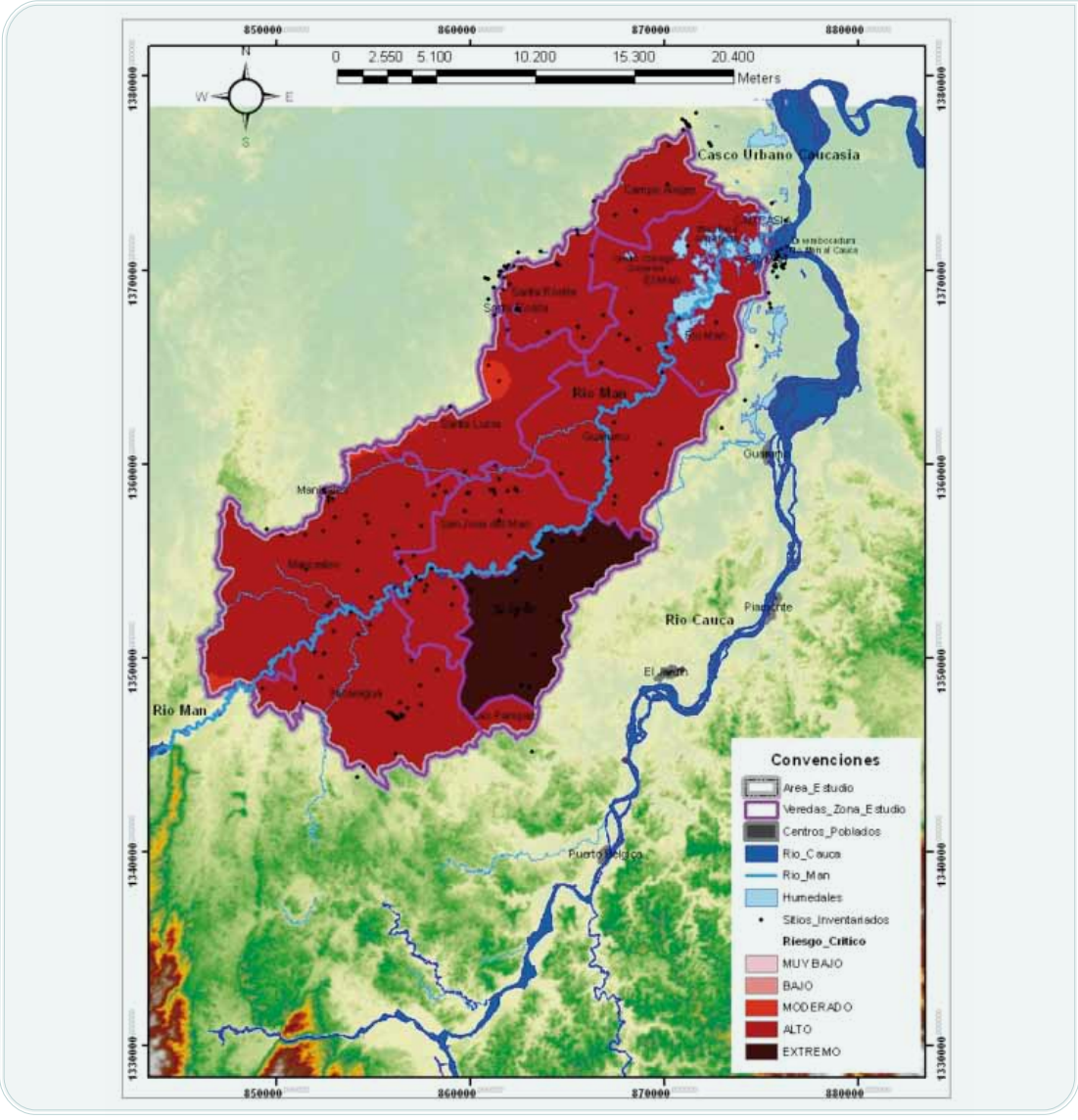


Figura 4-22 Mapa de riesgo a la contaminación total, condición crítica

4.4.2. Riesgo promedio

El segundo mapa propuesto y presentado está clasificado mediante la suma de los valores máximos, medios y mínimos, para lo cual se asigna una escala de valoración numérica para las diferentes clases del riesgo, variando desde uno (1) hasta cinco (5) asociándose a muy Bajo y Extremo respectivamente. La mayor combinación posible para la clasificación del riesgo, es que todas las actividades que generan un peligro de contaminación de las aguas subterráneas en interacción con la vulnerabilidad humana, arrojarán un riesgo extremo, en cuyo caso se tendría riesgo a la contaminación extremo por desarrollo urbano, producción agrícola, pecuaria, extracción minera y accidentes ambientales, con un valor de 25 (5 actividades x 5 valor numérico del riesgo extremo). Para los casos medios que todos tuvieran riesgo a la contaminación moderado 15 (5 x 3) y el caso mínimo cuando se tenga un riesgo a la contaminación muy bajo 5 (5 x 1). Se definen los valores intermedio de 10 y 20 para lograr la clasificación.

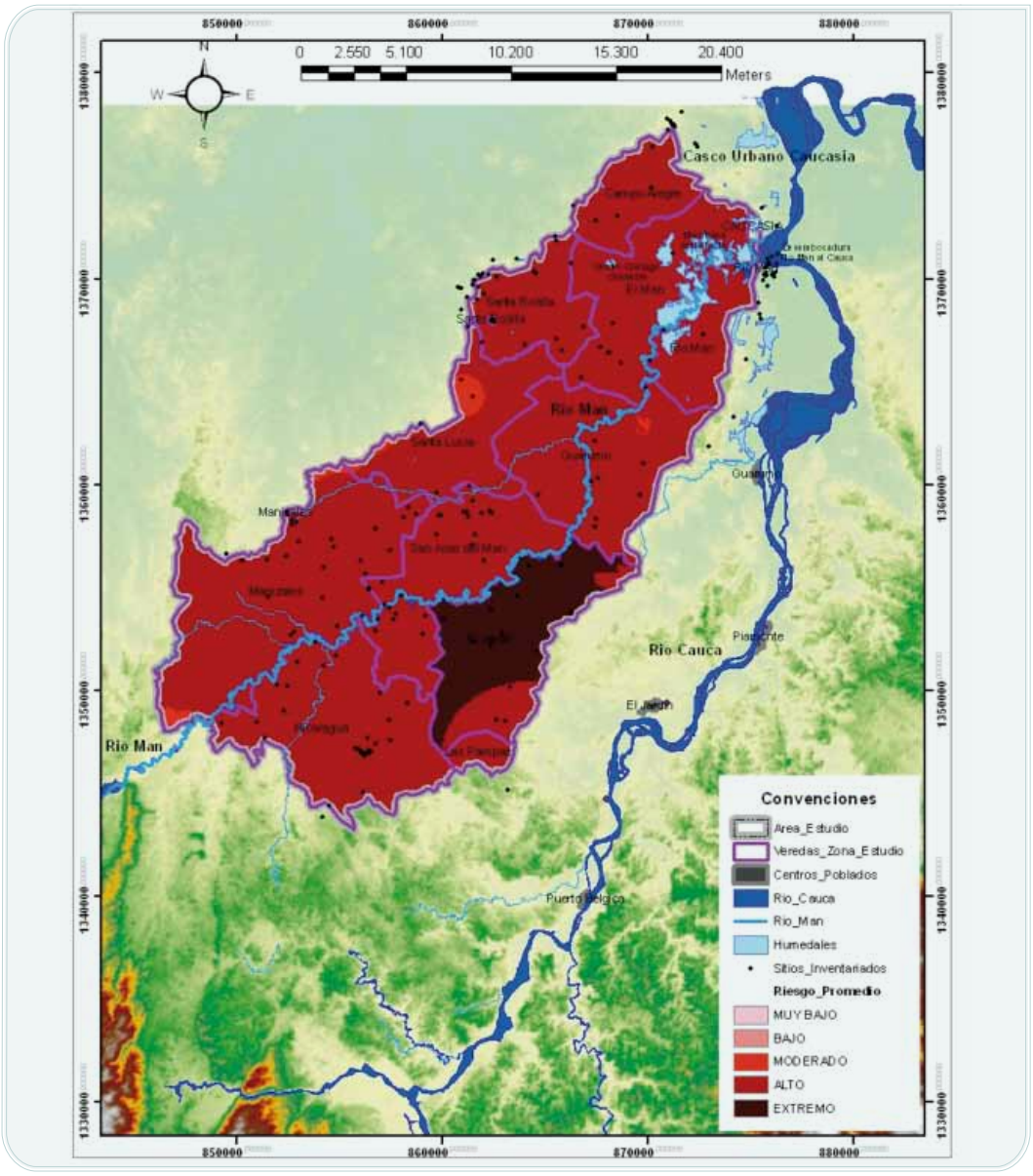


Figura 4-23 Mapa de riesgo a la contaminación, según clasificación por rangos

En el primer caso se tiene riesgo alto asociado al desarrollo urbano, alto a la producción agrícola, alto a la producción pecuaria, moderado a la extracción minera y alto a los accidentes ambientales, para una suma total de 19, lo cual indica una clase de riesgo alto a la contaminación para la zona común en análisis.

Con este método se conservan las categorías de riesgo a la contaminación extremo y alto ocupando el 99% del territorio y aparecen dos zonas con riesgo moderada en las veredas Guarumo y Santa Lucía, representando el 1% de la zona de estudio. La categoría de riesgo extremo se reduce al 9% en comparación al 11% obtenido en el paso número 1. Algunas zonas de la vereda El Jardín cambian de riesgo extremo a alto. Con estos cambios se tiene un porcentaje del 90% del área de estudio en riesgo alto a la contaminación por el conjunto de actividades identificadas en el proyecto (Figura 4-23).

4.4.3. Riesgo prevalente

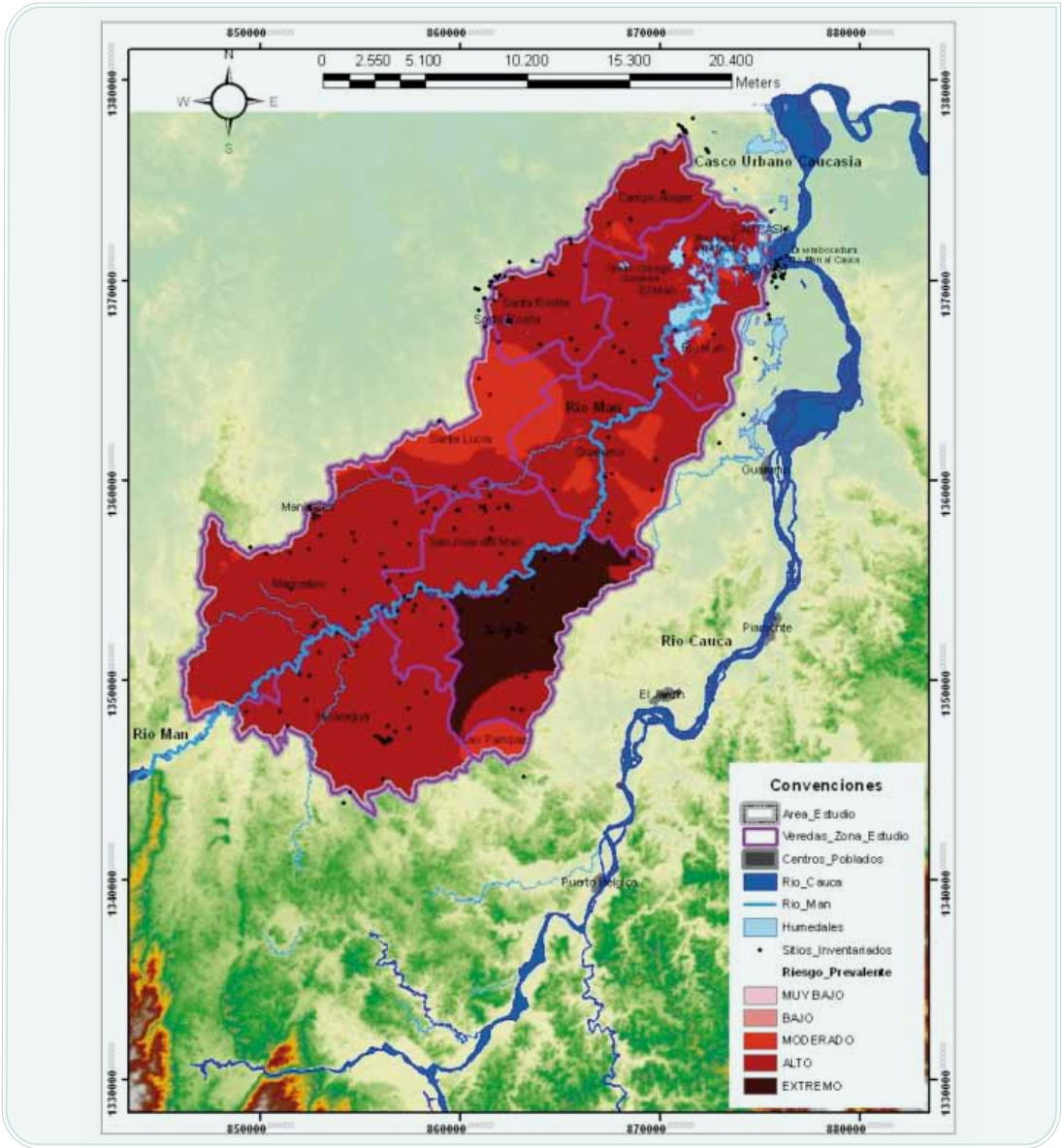


Figura 4-24 Mapa de riesgo a la contaminación, según categoría prevalente

El tercer y último mapa de riesgo a la contaminación se estimó a partir de la prevalencia de las categorías en cada actividad, en este caso se definió la categoría con el criterio de ubicar la clase de riesgo que por lo menos se presentara en tres de las cinco clases identificadas para la zona de estudio. El caso de la primera zona de análisis en común, se presentan cuatro riesgos con categoría alto, por lo tanto se clasifica como alto, mientras que la zona correspondiente al valor 3, tiene dos categorías de riesgo alto y tres categorías de riesgo moderado permitiendo clasificar como prevalente el riesgo a la contaminación moderado.

En este caso la zona en riesgo extremo a la contaminación se conserva igual que el paso dos, con un área en esta categoría del 9%. El riesgo a la contaminación alto, disminuyó en comparación con los dos pasos anteriores al 81%, debido a la existencia de varias actividades con riesgo moderado. Las zonas donde se presenta el cambio de riesgo alto a moderado son Santa Rosita, Santa Lucía, Guarumo, Las Pampas, Campo Alegre, Río Man, el Man y Nicaragua, para un área total del 10% (Figura 4-24).

5. CONCLUSIONES

La falta de resiliencia, considera cinco (5) variables que permiten evaluar la falta de acciones que se deben promover, fortalecer o priorizar para lograr un mayor nivel de seguridad, ellas son: a) existencia de planes relacionados con el gobierno en materia de ordenamiento territorial, saneamiento básico y manejo de cuencas, b) programas de educación ambiental, c) programas de prevención y atención de emergencias relacionadas con la contaminación del agua, d) existencia de fuentes alternas de abastecimiento y e) existencia de organizaciones sociales.

5. CONCLUSIONES

Con el desarrollo del trabajo se logra proponer y aplicar una metodología para evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas mediante la interacción del peligro a la contaminación y la vulnerabilidad de la población dependiente del recurso en mención. Este trabajo se convierte en una primera aproximación en el país para lograr la interacción entre el peligro de contaminación y la vulnerabilidad humana, trascendiendo hacia el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, entendiendo este último como el resultado del peligro adaptado a la escala del impacto potencial en la población humana o en los ecosistemas acuáticos que dependen del acuífero, tal y como lo definen Foster et al (2002).

También es importante destacar que el desarrollo metodológico propuesto incluye metodologías ya tratadas y validadas por la comunidad académica como las utilizadas para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca del medio acuífero, la carga contaminante y el peligro a la contaminación de las aguas subterráneas, para lo cual se remite a las fuentes específicas en varias partes del documento e incluye nuevos aspectos conceptuales con relación a la determinación de la vulnerabilidad humana y por eso el énfasis en este componente del riesgo durante el desarrollo del trabajo, por lo tanto la priorización de variables y el ejercicio de jerarquización realizada para determinar los valores de importancia para la exposición, fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia, están sujetos a discusión y a la espera de nuevas contribuciones y aplicaciones.

Los mapas de vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos son considerados como herramientas adecuadas para la toma de decisiones respecto a la protección de la calidad del agua subterránea, sin embargo de acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología DRASTIC, se obtienen dos clases de vulnerabilidad en la zona de estudio; moderada en el 89% y baja en el 11%, lo cual no permite priorizar de manera efectiva zonas para la aplicación de medidas de gestión.

La evaluación de la carga contaminante se realiza partiendo de un inventario de las fuentes potenciales de contaminación en la zona objeto de estudio. A partir del inventario se agruparon las fuentes, según su relación con cinco (5) actividades principales: i) el desarrollo urbano, ii) la producción pecuaria, iii) la producción agrícola, iv) la extracción minera y v) los accidentes ambientales. En la calificación que se realiza para el índice potencial de carga contaminante, se debe tener en cuenta que por cada actividad principal potencialmente contaminante, se puede encontrar para un mismo

sitio inventariado y caracterizado varias fuentes potenciales de contaminación, lo cual podría considerarse como algo que agravaría o produciría un mayor índice potencial de carga contaminante en el sitio.

La determinación del peligro a la contaminación de las aguas subterráneas es realizada mediante un análisis matricial, el cual permite la interacción entre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero libre y la carga contaminante que está amenazando potencialmente el sistema. Se obtuvieron cinco (5) mapas de peligro a la contaminación, asociados al desarrollo urbano, la producción pecuaria, la producción agrícola, la extracción minera y los accidentes ambientales.

Con relación a la determinación de la vulnerabilidad humana al peligro de contaminación de las aguas subterráneas, se logra proponer un conjunto de variables y funciones que permiten obtener la exposición de la población dependiente del recurso hídrico subterráneo, la fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia. El 11% del área de estudio presenta vulnerabilidad humana alta, específicamente en el Corregimiento de El Jardín y el 89% moderada.

La evaluación del riesgo a la contaminación, entendido como la interacción entre el peligro a la contaminación de las aguas subterráneas y la vulnerabilidad humana, evidencia en la región del Bajo Cauca riesgos altos a extremos en más del 90% del territorio en análisis, lo cual es el resultado de la combinación de condiciones de peligro a la contaminación del agua subterránea que varían de moderado a extremo en zonas de vulnerabilidad humana moderada y alta.

Lo anterior, permite concluir que se requiere en la zona del Bajo Cauca antioqueño una gestión del riesgo, la cual debe procurar el establecimiento de medidas para su minimización, comprendiendo la implementación de acciones para controlar la carga contaminante y el establecimiento de medidas para disminuir la vulnerabilidad de la población. En éste sentido se proponen tres mapas de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas, crítico, promedio y prevalente con el fin de brindarle a los entes encargados de la protección de la calidad del agua y la salud de la población, tres panoramas sobre los cuales pueden priorizar y establecer las acciones pertinentes.

Por otra parte, la determinación de la vulnerabilidad ecosistémica fue planteada en los objetivos específicos “de ser posible”; ya que desde la formulación del proyecto se vislumbraba que cumplir con las dos metas podía desbordar en términos de tiempo, los plazos establecidos por el posgrado para desarrollar un trabajo de maestría. La búsqueda y revisión de información fue un proceso largo y dispendioso y por ello no se alcanzó a sintetizar ideas y propuestas en torno a la vulnerabilidad ecosistémica.

5.1. Recomendaciones

De acuerdo con los resultados se identifica el Corregimiento de El Jardín como la zona de riesgo extremo a la contaminación de las aguas subterráneas, razón por la cual deben priorizarse las medidas de gestión y ejecución que garanticen un mejoramiento de las condiciones actuales, evitando posibles enfermedades en la población relacionadas con el consumo de agua subterránea.

Deben implementarse medidas de control orientadas a cada una de las categorías de actividades contaminantes: solucionar los problemas asociados con el saneamiento

básico, promover el manejo adecuado de los fertilizantes en dosis óptimas que no acarreen un posible excedente de compuestos nitrogenados, implementar métodos de manejo de los desechos generados en la actividad minera y promover las actividades de sensibilización y educación con la comunidad.

Igualmente, es prioritario que las comunidades se fortalezcan a través de las organizaciones sociales con el objetivo de hacer de su territorio, un lugar digno para la vida, en el cual se ofrezcan las condiciones mínimas que apunten a lograr el bienestar del ser humano. En este mismo sentido, una comunidad organizada, educada, sensibilizada y orientada mediante el establecimiento de medidas conducentes a minimizar el riesgo, logrará despertar en cada uno de sus habitantes la necesidad de proteger el tesoro inmenso pero vulnerable, que tienen bajo sus pies.

Se pueden mejorar las condiciones que tiene la población con relación al acceso al agua potable, garantizando una buena prestación del servicio, la cual debe comenzar con la construcción y optimización de los sistemas de acueductos, complementados con los tratamientos requeridos para que el recurso sea apto para el consumo humano.

La consecución y actualización de la información requerida para la aplicación de la metodología para la determinación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas debe realizarse preferiblemente cada año con el fin de poder realizar el control y seguimiento a los indicadores planteados para cada componente del riesgo. Esto igualmente permitirá medir la efectividad de las acciones realizadas orientadas a la disminución del riesgo a la contaminación, específicamente en cada uno de sus componentes.

Es un deber reconocer que trabajar con variables sociales y económicas requiere de años de estudio, de tener la formación académica y profesional adecuada y de la conformación de un grupo de trabajo que permita dilucidar aquellas dudas o reflexiones que van surgiendo en la medida que se encara un proyecto que involucra indicadores que de una manera u otra presentan una relación con un abanico de variables que son dependientes en muchos casos entre sí. Con este reconocimiento, se quiere dejar expreso en la investigación que los aportes realizados por profesionales de otras disciplinas fueron vitales para el planteamiento metodológico y la aplicación del mismo. En este mismo sentido, es importante mencionar que el ejercicio de jerarquización de las componentes de la vulnerabilidad humana es un primer acercamiento que se tiene al respecto y que por lo tanto está sujeto a optimizarse en el tiempo, a medida que se comience a implementar en otras zonas y que se integre personal de otras disciplinas que puedan generar nuevos aportes y por lo tanto modificaciones a la metodología propuesta.

Se debe avanzar en el planteamiento de un modelo para determinar la vulnerabilidad de los ecosistemas dependientes del recurso hídrico subterráneo a partir de futuros proyectos de investigación, delimitando el ecosistema a evaluar y su interacción con el medio acuífero. Para este planteamiento se recomienda considerar la zonificación ambiental establecida por la Autoridad Ambiental competente y el complejo de humedales asociados a la zona de estudio.

Finalmente, este proyecto y los resultados obtenidos deben ser dados a conocer a la comunidad del Bajo Cauca antioqueño, específicamente a la población asentada en la zona de estudio, a las administraciones municipales de Cáceres y Caucasia y a la Autoridad Ambiental competente, Corantioquia.

La palabra Bajo Cauca Antioqueño es sinónimo de alegría y amor.

Sin más preámbulos...

TARARAZA...TARARAZA TARAZA TARAZA

Este año el 8 de Diciembre uno de los días de Nuestra Madre de Dios, no El 18 ni El 20 me Cáceres con mi novia La Linda. La Ilusión de dos seres humanos que queremos una casa con El Jardín bien bonito para ser felices.

Uno de los viajes obligados en la luna de miel o durante la vida de Cacerí, será visitar Puerto Colombia y Puerto Antioquia, navegar por los Ríos Cauca, Nechí y entrar por el Rio Man y dar un paseo por la hermosa Ciénaga Colombia.

Uno puede conocer una Bella Palmira o El Bagre. Debajo de un Guarumo o un Naranjal mandarle las manos a Las Pampas a mi novia, así me ponga Colorado un ratico. O ella también puede conocer un Tigre, El Toro, un Margento o El Man y hasta llegar a su Palomar. Le pediré a San José, San Juan, Santa Clara, Santa Rosita, San Antonio, a Arcángeles, Ángeles y hasta La Virgen María, que esto no suceda.

Eso sí, no iremos a la Isla de la Amargura, ni nos dejaremos llenar de alguna clase de Malvinas, Nechíquiera tener una relación con La Escondida. No olvidaremos a nuestros amigos y amigas como la especial Zaragoza.

Bueno con algunos Comuneros nos reuniremos a comer Manizales, mientras contamos emocionantes historias de nuestra Antioquia y recibir consejos de nuestros Río Viejos, como el de cuidar la Nicaragua, ya que el AGUA es nuestra fuente de vida.

Para terminar deseo que todos seamos muy felices y nos mantengamos Campo Alegres en la vida como Don Fidel.

Un abrazo para todos.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Ahlfeld, D. y Hoque, Y., (2008). Impact of simulation model solver performance on groundwater management problems. Ground Water, Volume 46 Issue 5: 716-726.

Anderson, M. P. y Munter, J. A., (1981). Seasonal reversals of ground-water flow around lakes and relevance to stagnation point and lakes budgets. Water Resources Research 17, No. 4: 1139-1150.

Anderson, M. P., (1991). Aquifer heterogeneity – a geological perspective, In: Parameter identification and Estimation for Aquifer and Reservoir Characterization, Nat´l. Water Well Assoc., Columbus, Ohio, 3-22.

Anderson, M. P. y Woessner, W. W., (1992). Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego. 381 p.

Anderson, M. P. y Pint, C. D., (2002). Groundwater–lake interaction: Response to Climate Change Vilas County, Wisconsin. Final Report to the Water Resources Institute University of Wisconsin.10 p.

Aguas Ltda., (2007). Prospecciones Geológicas. Informe perforación de los Piezómetros para Nivelación y Muestreo Hidroquímico en el Bajo Cauca Antioqueño. Medellín. 12 p.

Ashby, S. F., Bosl, W. J., Falgout, R. D., Smith, S. G. y Tompson, A. F. B., (1999). Numerical simulation of groundwater flow and contaminant transport on the CRAY T3D and C90 supercomputers. International Journal of High Performance Computing Applications 13, No. 1: 80–93.

Ayenew, T. y Tilahun, N., (2008). Flow models Assessment of lake–groundwater interactions and anthropogenic stresses, using numerical groundwater flow model, for a Rift lake catchment in central Ethiopia. Lakes & Reservoirs: Research and Management 13: 325–343.

Barco, O. J. y Cuartas, A., (1998). Estimación de la Evaporación en Colombia. Trabajo Dirigido de Grado, Facultad de Minas, Ingeniería Civil, Medellín. 136 p.

Belanger, T. V. y Mikutel, D. F., (1985). On the use of seepage meters to estimate groundwater nutrient loading to lakes [J]. Water Res. Bull., 1985, 21(2): 265-272.

Betancur, T., (1996). Modelamiento de acuíferos utilizando sistemas de información geográfica para la región de Urabá. Trabajo de grado: Maestría en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 215 p.

Betancur, T., (2007). Técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas para evaluar procesos hidrológicos en los humedales del Bajo Cauca antioqueño, Colombia. Informe 1, CPR 14031 OIEA – U de A. 17 p.

Betancur, T., (2008). Una aproximación al entendimiento de la dinámica de un sistema acuífero tropical, caso de estudio: El Bajo Cauca antioqueño. Tesis doctoral, Universidad de Antioquia. 211 p.

Betancur, T. y Palacio, C. A., (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). Revista Dyna, Año 76, Nro. 160: 39-49.

Blandford, T. N. y Huyakorn, P. S., (1990). WHPA: a modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas, U.S. EPA, Office of Ground- Water Protection.

Boswell, J. S. y Olyphant, G. A., (2007). Modeling the hydrologic response of groundwater dominated wetlands to transient boundary conditions: implications for wetland restoration. Journal of Hydrology 332: 467-476.

Bredehoeft, J., (2005). The conceptualization model problema –surprise. Hydrogeology journal, 13:37-46.

Buxton, H. T., Reilly, T. E., Pollock, D. W., y Smolensky, D. A., (1990). Particle tracking analysis of recharge areas on Long Island, New York. Ground Water 29 (1): 63-71.

Caballero, H., (2001). Los Humedales del Magdalena Medio Antioqueño desde una Perspectiva Física y Sociocultural. Gestión y Ambiente. Vol 4, No 2:67-79.

Carlier, E., (2008). Comparison of three models of dispersion in dual porosity media. Environ Geol 55:433–440.

Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J. y Slooten, L., (2005). Inverse problem in hydrogeology. Hydrogeology journal 13:206–222.

Carrera, J. y Neuman, S. P., (1986). Estimation of aquifer parameters under steady-state and transient conditions. Water Resour Res 22:199–210.

Cheng, X. y Anderson, M., (1993). Numerical simulation of groundwater interaction with lakes allowing for fluctuating lake levels. Ground Water, 31(6):929–933.

Chen, X. y Chen, X., (2003). “Stream water infiltration, bank storage, and storage zona changes due to stream-stage fluctuations”. Journal of Hydrology: 246-264.

Chen, J., Zhou, Z., y Jia, S., (2005). Analytical solution of groundwater fluctuations in estuarine aquifer [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 17(5): 641-646.

Childs, E. C., (1960). The nonsteady state of the water table in drained land. J Geophys Res. 65: 780-782.

Clement, T. P. (1997). RT3D - A modular computer code for simulating reactive multi-species transport in 3-dimensional groundwater aquifers. PNNL-SA-28967. Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory.

CORANTIOQUIA., (2003). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Man. 142 p.

Corbett, D. R., Chanton, J., Burnett, W. et al., (1999) Patterns of groundwater discharge into Florida Bay. Limnol Oceanogr, 44(4): 1045-105.

Corporación Montañitas y CORANTIOQUIA., (2004). Plan de Manejo Ambiental de la Ciénaga Colombia en el municipio de Caucasia-Antioquia. 248 p.

Council, G. W., (1997). Simulating lake-gorundwater interaction with MODFLOW. Proceedings of the 1997 Georgia Water Resources Conference.20-22.

Council, G. W., (1998). A lake package for MODFLOW. In MODFLOW’98: Proceedings of the 3rd International Conference of the International Ground Water Modeling Center, 675-682. Golden, Colorado: Colorado School of Mines.

Crosbie, R. S., Binning, P., Kalma, J. D., (2005). A time series approach to inferring groundwater recharge using the wáter table fluctuation method. Water Resources Research 41 (1), 1– 9.

Custodio, E., (1997). “Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y

la incertidumbre". En: "La evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica". Editado por: Custodio E., Llamas, M. R. y Samper, J. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo España e Instituto Geominero de España. Madrid. 455 p.

Custodio, E., Llamas, R. y Sahuquillo, A. (2000). Retos de la hidrología subterránea. Ingeniería del agua, Vol. 7, No 1, marzo de 2000, 23- 36.

Custodio, E., (2001). Aspectos hidrológicos de los humedales que dependen del agua subterránea. 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doña Ana. España. 20-26.

Custodio, E. y Mook, W., (2002). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones (Traducción al español). Wook Editores, Madrid.

Davison, M., y Lerner, M. A., (2000). Evaluating Natural Attenuation of Groundwater Pollution from a Coal-Carbonisation Plant: Developing a Local-Scale Model using MODFLOW, MODTMR and MTSD. Engineering Geology. 0 J CIWEM.

Desbarats, A. J., (1990). Macrodispersion in sand-shale sequences. Water Resources Research 26(1), 153-164 pp.

Dickinson J. E., James, S. C., Mehl, S., Hill, M. C., Leake, S. A., Zyvoloski, G. A., Faunt, C. C. y Eddebbarh, A. A., (2007). A new ghost-node method for linking different models and initial investigations of heterogeneity and nonmatching grids. Advances in Water Resources 30, no. 8: 1722–1736.

Doble, R., Simmons, C., Jolly, I. y Walker, G., (2006). Spatial relationships between vegetation cover and irrigation-induced groundwater discharge on a semi-arid floodplain, Australia. Journal of Hydrology 329: 75–97.

Fenske, J. P., Leake, S. A., y Prudic, D. E., (1996), Documentation of a computer program (RES1) to simulate leakage from reservoirs using the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW): U.S. Geological Survey Open-File Report 96-364, 51 p.

Franz, T. y Guiguer, N., (1990). FLOWPATH, two-dimensional horizontal aquifer simulation model. Waterloo Hydrogeologic Software, Waterloo, Ontario, 74 p.

Garrett, A., Huang, J., Goltz, M. N. y Lamont, G. B., (1999). Parallel real-valued genetic algorithms for bioremediation optimization of TCE-contaminated ground water. In Proceedings of 1999 Congress on Evolutionary Computation, Washington DC, 6–9 July, vol. 3, 2183–2189.

Gelhar, L. W., Mantoglou, A., Welter, C. y Rehfeldt, K. R., (1985). A rewiew of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porus media. EPRI EA-4190. Electric Power Research Intitute, Palo Alto, CA., 116 p.

Gómez, A., (En ejecución). Generación de modelos hidrológicos conceptuales basados en información escasa: aplicación a la cuenca del río Man - Bajo Cauca Antioqueño. Universidad de Antioquia: Trabajo de investigación. Medellín.

González, F., Montes, C., Herrera, P. y Sastre, A., (1988). Genetical typology of the Madrid aquifer wetlands. Proc. Intern. Sympos. Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions.

González, F., Peco, B., Levassor, C., Llorca, C. y Compan, J., (1989). La dehesa dp Colmenar. Aula de Ecología. Ayuntamiento de Colmenar Viejo. Madrid.

González, H., (1996). Mapa geológico del departamento de Antioquia. INGEOMINAS. 92 p.

González, H. y Londoño, C., (2001). Mapa geológico del departamento de Córdoba. INGEOMINAS. 77 p.

Grebenyukov, P. G., (2001). Interaction between surface and subsurface waters: Case study of a region in Kazakhstan. Water Resources. Vol. 28, No. 1, 22-28.

Haitjema, H. M., (1995). Analytic Element Modeling of Groundwater Flow. San Diego, California: Academic Press.

Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., y McDonald, M. G., (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model—User guide to modularization concepts and The Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

Harbaugh, A. W., (2005). "MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model". The Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

Harmar, O. y Clifford, N., (2007) Geomorphological explanation of the long profile of the lower Mississippi River. En: Geomorphology 84, pp 222-240. Disponible en www.sciencedirect.com.

Healy, R. W., y Cook, P. G., (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal 10: 91-109.

Hostetler, C. J., Erikson, R. L., Fruchter, J. S. y Kincaid, C. T., (1988). Overview of FASTCHEM TM code package: application to chemical transport problems, EQ-5870-CCM, Vol.1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

Huang, J., Christ, J. A., y Mark, N., (2008). An Assembly Model for Simulation of Large-Scale Ground Water Flow and Transport. Ground Water vol. 46, No. 6. 882–892.

Hunt, R. J. y Krohelski, J. T., (1996). The application of an analytic element model to investigate groundwater-lake interactions at Pretty Lake, Wisconsin: Journal of Lake and Reservoir Management v. 12, No. 4: 487-495.

Hunt, R. J., Lin, Y., Krohelski, J. T. y Juskem, P. F., (2000). Simulation of the shallow hydrologic system in the vicinity of Middle Genesee Lake, Wisconsin, using analytic elements and parameter estimator. U.S.Geological Survey Water Resources Investigations Report 00-4136.

Hunt, R. J., (2003). Ground Water – Lake interaction modeling using the LAK3 Package for MODFLOW2000 (invited contribution for special MODFLOW2001 issue): Ground Water, v. 41, no. 2, p. 114-118.

Hunt, R. J., Haitjema, H. M. Krohelski, J. T. y Feinstein, D. T., (2003). Simulating ground water-lake interactions: approaches and insights. Ground Water 41: 227–237.

Hunt, R. J., Feinstein, D. T., Pint, C. D. y Anderson, M. P., (2005). The importance of diverse data types to calibrate a watershed model of the Trout Lake Basin, northern Wisconsin, USA: Journal of Hydrology, volume. 321, No. 1-4: 286-296.

Hunt, R. J., Strand, M. y Walker, J. F., (2006). Measuring groundwater-surface water interaction and its effect on wetland stream benthic productivity, Trout Lake watershed, northern Wisconsin, USA: Journal of Hydrology volume. 320, No. 3-4, 370-384.

Huyakorn, P. S., y Pinter, G. F., (1983). Computational Methods in Subsurface Flow. Academic Press. 473 p.

IDEAM, (2005). Atlas climatológico de Colombia. Imprenta Nacional de Colombia. 219 p.

IGAC., (1979). Estudio de suelos del departamento de Antioquia. Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander Von Humboldt., (1997). Humedales Interiores de Colombia, Bases Técnicas para su Conservación y Desarrollo Sostenible.

Jiménez, G., (2006). Metodología de Evaluación rápida de calidad Ambiental en Humedales. Caso Ciénaga Colombia. Universidad Nacional: Medellín, 69 p.

Jobson, H. E. y Harbaugh, A. W., (1999). Modifications to the diffusion analogy surface-water flow model (DAFLOW) for coupling to the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW): U.S. Geological Survey Open-File Report 99-217, 107 p.

Jolly, I.D, McEwan, K. L. y Holland, K.L., (2008). Review of groundwater–surface water interactions

in arid/semi-arid wetlands wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology. Ecohydrol. 1, 43–58. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/eco.6.

Jones, I., Davison, R. M., y Lernerd, D. N., (1998). The importance of understanding groundwater flow history in assessing present day groundwater contamination patterns; a case study. In: Contaminated Land and Groundwater: Future Directions. Engineering Geology Special Publication 14. (D. N. Lerner and N. R. G. Walton (Eds).) Geological Society, London, 137p.

Kang, W. J., Kolasa, K. V., y Rials, M. W., (2005). Groundwater inflow and associated transport of phosphorus to a hypereutrophic lake [J]. Environmental Geology, 47(4): 565-575.

Kasahara, T. y Wondzell, S. M., (2003). Geomorphic controls on hyphoreic exchange flow in mountain streams. Water Resources Research 39, no. 1: 1005, doi:10.1029/ 2002WR001386.

Kincaid, C. T., (1988). FASTCHEM TM package, V.3: User´s guide to the ETUBE pathline and streamtube database code, EPRI EA-5870-CCM, Electric Power Research Institute.

Kolak, J. J., Matty, J. M., y Larson, G. J., et al., (1999). Ground-water large-lake interactions in Saginaw Bay, Lake Huron: a geochemical and isotopic approach [J].

Konikow, L. F., y Bredehoeft, J. D., (1978). Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water, Techniques of Water- Resources nvestiagtions Book 7. Chap. C2, USGS, 90 p.

Konikow, L. F., Goode, D. J. y Hornberger, G. Z., (1996). A three-dimensional method-of-characteristics solutetransport model (MOC3D): U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 p.

Kusler, et al., (2004) Humedales. En: Temas: Investigación y Ciencia (Edición Española de Scientific American). No 35: 64 - 72.

Langevin, C., Swain, E., y Wolfert, M., (2005). Simulation of integrated surface-water/ground-water flow and salinity for a coastal wetland and adjacent estuary. Journal of Hydrology 314, pp 212-234.

Lee, T. M., (1996). Hydrogeologic controls on the Groundwater interactions with an acidic lake in karst terrain, Lake Barco, Florida. Water Resources Research 32, No. 4:831-844.

Lewis, F. M., Voss, C. I. y Rubin, J., (1986). Numerical simulation of advective dispersive multisolute transport with sorption, ion exchange and equilibrium chemistry. USGS, Water Resources Investigations Report 86-402, 165 p.

Ley 99 de 1993. Ministerio de Ambiente.

Ley 357 de 1997. Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Relaciones Exteriores.

Li, Y., Wang, C., Yang, L. y Li, Y., (2007). Influence of Seepage Face Obliquity on Discharge of Groundwater and Its Pollutant Into Lake from a Typical Unconfined Aquifer. Journal of Hydrodynamics: 19(6):756-761.

McDonald, M. C. y Harbaugh, A. W., (1988). “A modular three-dimensional finite-difference groundwater model”. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. Chapter A1, 586 p.

Mehl S. W. y Hill, M. C., (2002a). Development and evaluation of groundwater models using shared nodes. Advancesin Water Resources 25, No. 5: 497–511.

Mehl S. W. y Hill, M. C., (2002b). Evaluation of a local grid refinement method for steady-state block-centered finite difference groundwater models. In Computational Methods in Water Resources, v. 1, Developments in Water Science, ed.S.M. Hassanizadeh, R.J. Schlotting, W.H. Gray, and G.F. Pinder, 367–374, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

Mehl, S., (2003). Development and evaluation of local grid refinement methods for forward and inverse groundwater models. Ph.D. thesis, Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado.

Mehl S. y Hill, M. C., (2004). Three-dimensional local grid refinement for block-centered finite-difference groundwater models using iteratively coupled shared nodes: A new method of interpolation and analysis of errors. Advances inWater Resources 27, No. 9: 899–912.

Mejía, O., (2006). Técnicas geoestadísticas en Hidrogeología. Caso de Estudio el Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de grado, Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Universidad de San Buenaventura. Medellín. 108 p.

Mejía O., Betancur T. y Londoño, L., (2007). Aplicación de técnicas geoestadísticas a la hidrogeología del Bajo Cauca antioqueño. Medellín. Revista Dyna, Vol. 74 No.152: 137-149.

Mejía, O. y CORANTIOQUIA., (2008). El Recurso Hídrico en la jurisdicción de CORANTIOQUIA 1995 – 2007. Medellín, primera edición. 207 p.

Merritt, M. L., (1997). Simulation of the water-table altitude in the Biscayne aquifer, southern Dade County, Florida, water years 1945-89: U.S. Geological Survey Water- Supply Paper 2458, 148 p.

Merritt, M. L. y Konikow, L. F., (2000). Documentation of a computer program to simulate lake-acuifer interaction using the MODFLOW ground-water flow model and the MOC3D solute-transport model. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4167.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, (2008).

Molerio, L. F. y Torres, J. C., (2002). Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de aguas subterráneas. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXIII, No. 2:38-45.

Munsell Soil Color Chart, (1975).

Mylopoulos, N., Mylopoulos, Y., Veranis, N. y Tolikas, D., (2007). Groundwater modeling and management in a complex lake-aquifer system. Water Resour Manage (2007) 21:469–494.

Nair, S. K. y Wilsnack, M. M., (1998). A comparison of two approaches to simulating lake-ground water interactions with MODFLOW: Proceedings of MODFLOW 98 Conference, October 4-8, Golden, Colorado: volume 2: 871-878.

Neotrópicos, CORTANTIOQUIA, (2001). Diseño e implementación inicial de los componentes institucional y operativo de Visión Panzenú, Contrato 2658 de 2000. Informe final: Medellín, CORANTIOQUA, 155 p.

Neuman, S. P., (2003). Maximum likelihood Bayesian averaging of alternative conceptual mathematical models. Stochastic Environ Res Risk Assess 17(5):291–305, doi: 10.1007/ s00477-003- 0151-7

Neuman, S. P. y Wierenga, P.J., (2003). A comprehensive strategy of hydrogeologic modeling and uncertainty analysis for nuclear facilities and sites. NUREG/CR-6805, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.

Niswonger, R. G. y Prudic, D. E., (2006). Documentation f The Streamflow-Routing (SFR2) Package to include unsaturated flow beneath streams- a modification to SFR1 techniques. U.S. Geological Survey Chapter 13. Section A, Ground Water of Book 6, Modeling Techniques Version 1.10.

Osman, Y. y Bruen, M., (2002). “Modeling stream-acuifer seepage in an alluvial aquifer: an improved loosing-stream package for MODFLOW”. Journal of Hydrology: 264, 69-86.

Palacio, P., (en ejecución). Modelo Hidrológico Conceptual para la Cuenca del Río Man a partir de Técnicas Hidrológicas, hidrogeoquímicas e isotópicas. Universidad de Antioquia: Tesis Doctoral. Medellín.

Payne, D. F., Provost, A. M. y Voss, C. I., (2003). Parallel development of MODFLOW and SUTRA models in coastal Georgia, South Carolina, and Florida: An approach to study regional ground-water flow

and local saltwater intrusion. In Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference, April 23–24, University of Georgia, Athens. Atlanta, Georgia: Georgia Water Resources Institute.

Pollock, D. W., (1988). Semianalytical computation of path lines for finite-difference models. Ground Water 26(6), 743-750.

Pollock, D. W., (1989). Documentation of computer programs to complete and display pathlines using results from the U.S Geological Survey modular three –dimensional finite-difference ground-water model, USGS, Open File Report 89-381, 81 p.

Pollock, D. W., (1994). User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3:A particle racking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. U. S. GEOLOGICAL SURVEY Open-File Report 94-464.

Prickett, T. A., Naymik, T. G., y Lonnquist, C. G., (1981). A "Random-Walk" Solute Transport Model for Selected Groundwater Quality Evaluations, Illinois State Water Survey, Bulletin 65, 103 p.

Prudic, D. E., (1989). Documentation of a computer program to somulate stream-acuifer relations using a modular finite-difference ground-water flor model. U.S. Geological Survey Open-File Report 88-729.

Prudic, D. E., Konikow, L. F. y Banta, E. R., (2004). A New Streamflow routing (SFR1) package to Simulate Stream-Aquifer Interaction with MODFLOW-2000", U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1042, 95 p.

Quintero, D., (2008). Caracterización de la cuenca del humedal ciénaga Colombia a partir de información secundaria y utilizando herramientas geoinformáticas. Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática. Medellín, Universidad de Antioquia, 65 p.

Quintero, D., Montoya, D. y Betancur, T., (2009). Propuesta metodológica para obtener modelo digitales de Elevación – MDE- de adecuada resolución con fines hidrológicos en zonas de humedales. Revista Gestión y Ambiente Vol 12 – No 2 Mayo a Agosto.

Ramírez, A. y Viña, G. (1998). Limnología Colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá.

RAMSAR, (1971). Convención sobre los humedales. Documento informativo Ramsar No. 1. [en línea]. Disponible en http://www.ramsar.org/about/info2007sp-01.pdf

Rasmussen, W. C. y Andreasen, G. E., (1959). Hydrologyc budget of the Beaverdam Creek Basin, Maryland. U.S. Geological Survey Water – Suply Pap 1472: 106 p.

Resolución 0157 de 2004. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Resolución 0196 de 2006. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Restrepo, J. I., Montoya, A. M. y Obeysekera, J., (1998). A wetland simulation module for the MODFLOW ground water model. Ground Water 36: 764–770.

Rumbaugh, J. O. y Rumbaugh, B. D., (2004). Command Reference for GroundwaterVistas. Version 4. Environmental Simulations Inc. 253 p.

Santa, D., (2009). Identificación de interacciones hidrológicas entre el humedal Ciénaga Colombia y el acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño mediante la utilización de técnicas hidroquímicas. Trabajo de investigación: Universidad de Antioquia. Medellín, 118 p.

Shafer, J .M., (1987). Reserve pathline calculation of time related capture zones in nonuniform flow. Ground Water 25 (3), 283-289.

Shafer, J. M., (1990). GWPATH, Version 4.0, J. M. Shafer, Champaign, IL.,

Silliman, S. E. y Wright, A. L., (1988). Stochastic analysis of paths of high hydraulic conductivity in porous media. Water Resources Research 24 (11), 1901-1910.

Sinha, E. y Minsker, B. S., (2007). Multiscale island injection genetic algorithms for groundwater remediation. Advances in Water Resources 30, no. 9: 1933–1942.

Skalbeck, J. D., Reed, D. M., Hunt, R. J. y Lambert, J. D., (2009). Relating groundwater to seasonal wetlands in southeastern Wisconsin, USA. Hydrogeology Journal 17(1): 215-228.

Sophocleous, M. y Pekins, S., (1993). "Calibrated models as management tools for stream-acuifer systems: The case of central Kansas, USA". Journal of Hydrology. 152, 31-56.

Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Sultan, R., Garfias, J. y McLaren, R. G., (2007). Análisis de la interacción del agua superficial y subterránea y su influencia en la extinción de zona húmedas. Ingeniería Hidráulica en Mexico. Vol. XXII, Num. 1: 15-30.

Sun, M. Z., Jeng, M. C. y Yeh, W.W.G. (1995). A proposed geological parameterization method of parameter identification in three dimensional groundwater modeling. Water Resour Res 31: 89-102.

Swain, E.D., Howie, B. y Dixon, J., (1996). Description and field analysis of a coupled groundwater/ surface-water flow model (MODFLOW/ BRANCH) with modifications for structures and wetlands in southern Dade County, Florida: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4118, 67 p.

Townley, L. R. y Davidson, M. R., (1988). Definition of capture zone for shallow water tables lakes. Journal of Hydrology: 104, 53-76.

Tsai, F. T. C., Sun, N. Z. y Yeh, W. W. G., (2003a). Global-local optimization for parameter structure identification in three-dimensional groundwater modeling. Water Resour Res 39:1043.

Tsai, F. T. C., Sun, N. Z. y Yeh, W. W .G., (2003b). A combinatorial optimization scheme for parameter structure identification in groundwater modeling. Ground Water 41:156–169.

Turner, J. V. y Townley, L. R., (2006). Determination of groundwater flowthrough regimes of shallow lakes and wetlands from numerical analysis of stable isotope and chloride tracer distribution patterns. Journal of Hydrology 320: 451–483.

Universidad Nacional – CORANTIOQUIA., (2002). Memorias del mapa geomorfológico de amenazas y áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000.

Universidad de Antioquia - CORANTIOQUIA., (2003). Evaluación Hidrogeológica entre los Municipios de Caucasia y Cáceres. Informe final del convenio interinstitucional 1201, Medellín, 365 p.

Universidad de Antioquia - CORANTIOQUIA., (2004). Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos al norte del municipio de Caucasia. Informe final del convenio interinstitucional 5119, Medellín, 344 p.

Universidad de Antioquia - CORANTIOQUIA., (2005). Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos en la cuenca del Río Cacerí. Informe final del convenio interinstitucional 5691, Medellín, 316 p.

Universidad de Antioquia - CORANTIOQUIA., (2006). Validación del modelo conceptual de los acuíferos en la territorial Panzenú. Informe final del convenio interinstitucional 5878, Medellín, 104 p.

Universidad de Antioquia., (2008). Segundo informe de ejecución del proyecto "Técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas para evaluar procesos hidrológicos en los humedales del Bajo Cauca antioqueño –Colombia". Medellín: Grupo GIGA, 26 p.

Vargas, N., (2004). Monitoreo de Aguas Subterráneas. Subdirección de Hidrología – IDEAM. Versión 13 de Julio de 2004. Consultada en web en http://www.ideam.gov.co/temas/guiaagua/Anexo%204.pdf.

Venkatesh , U., y Soumya, M., (2006). An optimal control analysis for baseflow externalities in an interconnected lake–aquifer system. Clean Techn Environ Policy (2006) 8:261–272.

Wai, O. W. H. y Lu, Q., (2000). An efficient parallel model for coastal transport process simulation. Advances in Water Resources 23, no. 7: 747–764.

Walton, R., Chapman, R. S. y Davis, J. E., (1996). Development and application of the wetlands dynamic water budget model. Wetlands 16: 347–357.

Wang, H. F. y Anderson, M. P., (1982). Introduction to groundwater modeling. W.H. Freeman and Company, San Francisco.

Watson, I. A., Crouch, R. S., Bastian, P. y Oswald, S. E., (2005). Advantages of using adaptive re-meshing and parallel rocessing for modelling biodegradation in groundwater. Advances in Water Resources 28, no. 11: 1143–1158.

Wilsnack, M. M, Welter, D. E., Montoya, A. M., Restrepo, J. y Obeysekera, J., (2001). Simulating flow in regional wetlands with de MODFLOW Wetlands Package. Journal of the American Water Resources Association: Vol. 37. No 3. Junio. 655-674.

Winter, T. C., (1976). Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and ground water. U.S. Geological Survey Professional Paper 1001.

Winter, T. C., (1981). Effects of the water table configuration in seepage through lake beds. Limnol. Ocenogr., 26: 925-934.

Winter, T. C., Judson, W. H., Franke, O. L y Alley, W. M., (1998). Groundwater and Surface water a single resource. Circular 1139, U.S. Geological Survey, Denver.

Zapata y Cossio., (1993). Geología de la plancha 93. Cáceres. INGEOMINAS. 72 p.

Zheng, C., Bradbury, K. R. y Anderson, M. P., (1988a). Role of interceptor ditches in limiting the spread of contaminants in ground water. Ground Water 26(6), 734-742.

Zheng, C., Wang, H. F., Anderson, M. P. y Bradbury, K. R., (1988b). Analysis of interceptor ditches for control of groundwater pollution. Journal of Hydrology: 98, 61-87.

Zheng, C., (1989). PATH3D, S.S Papadopulos & Assoc., Rockville, MD.

Zheng, C., (1990). MT3D: a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Ada, 170 p

Zheng C. y Wang, P., (1998). MT3DMS: A modular threedimensional multispeces transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Technical report, Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Corps of Engineers.

Zheng, C., Bennett, G. D. y Andrews, C. B., (1991). Analysis of ground water remedial alternatives at a Superfound site. Ground Water 29.

Zheng, C. y Bennett, G., (2002). Applied contaminant transport modeling. Wiley, NewYork. Segunda Edicion. 621 p.

Enlaces electrónicos

www.esri.com Consultada en 2008.

http://earth.google.es/ Consultada en 2009.

http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-3-3.htm Consultada en 2010.

REFERENCIAS

ADMINISTRACION MUNICIPAL DE CACERES y AGUASCOL S.A. Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. Municipio de Cáceres. 2008. Informe final.

ADMINISTRACION MUNICIPAL DE CACERES. Plan de Desarrollo municipal, 2008-2011. Nuestro compromiso es con el pueblo. 2008.

-------. Esquema de Ordenamiento Territorial 2001-2009. 2001.

ADMINISTRACION MUNICIPAL DE CAUCASIA y AGUASCOL S.A. Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos. Municipio de Caucasia, 2008.

ADMINISTRACION MUNICIPAL DE CAUCASIA. Plan de Desarrollo municipal, 2008-2011. Todos valen en una Caucasia productiva y competitiva. 2008.

-------. Plan Básico de Ordenamiento Territorial. 2000.

ALLER, L. DRASTIC; a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. U.S. Oklahoma; 1987. EPA/600/2-87-036: 1-455

AUGE, Miguel. Vulnerabilidad de acuíferos conceptos y métodos. Buenos Aires; 2004. 38 p.

BAEZ, Alfredo. Validación de mapas de vulnerabilidad en medio urbanos. En: I Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: metolodogía. (3: 20-22, junio. Toluca, México). Memorias. Toluca; 2001.

BETANCUR, L. y CORANTIOQUIA. Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca hidrográfica río Man. Antioquia; 2003. Informe final.

BETANCUR, Teresita. Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: el Bajo Cauca Antioqueño. Tesis Doctoral. Medellín, Colombia; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. 2008. 227 p.

BLARASIN, M. Determinación del riesgo a la contaminación del acuífero libre por sistemas de saneamiento in situ: ciudad de Río Cuarto. Departamento de Río Cuarto, Córdoba. Argentina. En: Publicación especial de la Asociación Argentina de Geología aplicada a la Ingeniería. 1993. p. 114-131.

CALDERON, Enrique. Agua segura. En: II Jornadas Técnicas de Discusión de la Cátedra del Agua. Gestión de riesgo asociada al recurso hídrico. (1: 17, Septiembre, Medellín, Colombia). Presentaciones. 2008.

CALVO, F. Panorama sobre los estudios sobre riesgos naturales en la geografía española. En: Riesgos Naturales. 2000. no 30. p. 21-35.

-------. Sociedades y territorios en riesgo. En: Colección la estrella polar. 2001, p. 186.

CARDONA, Omar Darío. Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 2001.

CENTRO DE ANTIOQUIA, CORANTIOQUIA. Resolución corporativa No 9328 (20, Marzo, 2007), por la cual se establecen las normas ambientales generales y las densidades máximas en suelo suburbano, rural, de protección y de parcelaciones para vivienda campestre en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.

CHARDON, Anne-Catherine. Amenaza, vulnerabilidad y sociedades urbanas. En: Gestión y Ambiente. Colombia. Agosto, 2008. Vol. 11, no 2,. p. 123-135.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2320 (27, Noviembre, 2009). Por la cual se modifica parcialmente la Resolución No. 1096 de 2000 que adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico — RAS

COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Noviembre, 2000). Bogota D.C.

COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO. Resolución 1096 (17, Noviembre, 2000). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Bogota D.C. 106 p.

CONSORCIO (ESSERE _ SANEAMBIENTE Ltda.) y CORANTIOQUIA. Plan maestro de acueducto y alcantarillado zona urbana del municipio de Caucasia. 2006. Informe final.

CORNIELLO, Alfonso; DUCCI, Daniela y RUGGIERI, Giovanni. Areal identification of groundwater nitrate contamination sources in periurban areas. En: J Soils sediments. 2007

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE RISARALDA. Plan de manejo integrado de Aguas Subterráneas en Pereira y Desquebradas. CARDER; 2007.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Evaluación de riesgo y el Plan de Manejo para la protección de las aguas subterráneas en el Valle del Cauca. CVC; 2002.

CORPORACIÓN MONTAÑAS y CORANTIOQUIA Plan de manejo ambiental del humedal Cienaga Colombia en el municipio de Caucasia. Medellín, Colombia. 2004.

CUTTER, Susan. Vulnerability to environmental hazards. En: Human Geography. 1996. p. 529-539.

CUTTER, Susan; BORUFF, Bryan y SHIRLEY, W. Lynn. Social Vulnerability to Environmental Hazards. En: SOCIAL SCIENCE QUARTERLY, Southwestern Social Science Association. 2003. Volume 84, Number 2, 20 p.

DARMENDRAIL, D. The French approach to contaminated-land management Revision 1. 2003. BRGM/RP-52276-FR, 148 p.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADISTICA (DANE). Metodología de la encuesta Nacional de Calidad de Vida, 2008.. DANE. Dirección Técnica de Metodología y Producción Estadística. DIMPE. 2009. Versión preliminar.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION. Una propuesta conceptual y metodológica para la aplicación de evaluaciones ambientales estratégicas. Bogota D.C. 2004. 32 p.

DUCCI, Daniela; DE MASI, Giuseppe y DELLI PRISCOLI, Giuseppe. Contamination risk of the Alburni Karst System (Southern Italy). En: Engineering Geology. 2008. p. 109-120.

DUCCI, Daniela; MASSONE, Héctor y BOCANEGRA, Emilia. Linkage of social and natural variables to nitrate groundwater contamination in multiple-use areas: Naples province (Italy) and Mar del Plata (Argentina). Universitá di Napoli. Federico II. Departamento de Ingeniería Geotécnica, 2005. 10 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for exposure assessment. USEPA. Washington D.C., USA. 1992. Fed Reg. 57:22888 – 22938.

FERREIRO, Antonio. Valoración económica del agua. En: editado por DIEGO AZQUETA y ANTONIO FERREIRO. Análisis económico y gestión de recursos naturales, Madrid, España. Editorial Alianza, 1994. Capítulo 11 p. 221-247.

FOSTER, Stephen e HIRATA, Ricardo. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS. Lima, Perú. 1988. Technical manual.

FOSTER, Stephen, et al. Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). Banco Mundial. Washington; 2002.

FRYER, M et al. Human exposure modeling for chemical risk assessment: a review of current approaches and research and policy implications. En: Environmental Science & Policy 9. 2006. p. 261 – 274.

GAVIRIA, Jorge Ignacio. Identificación y clasificación de fuentes potenciales de contaminación del acuífero libre del Bajo Cauca Antioqueño. Trabajo de pregrado Ingeniería Sanitaria. Medellín, Colombia; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. 2005. 206 p.

GAVIRIA, Jorge y BETANCUR, Teresita. Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca antioqueño. En: Gestión y Ambiente. Medellín, Colombia. Diciembre, universidad Nacional de Colombia. 2005. Vol. 8, no 2,. p. 85-102.

--------. Caracterización de carga contaminante al sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño. En: II Congreso Colombiano de Hidrogeología. (7: 1-7, Abril, Bucaramanga, Colombia). Ponencia. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. 2006.

--------. Procedimiento metodológico para determinar carga contaminante a un acuífero libre. En: II Congreso Colombiano de Hidrogeología. (7: 1-7, Abril, Bucaramanga, Colombia). Ponencia. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. 2006.

--------. Avances metodológicos para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. En: III Congreso Colombiano de Hidrogeología. (6: 5-10, julio, Bogota, Colombia). Ponencia. Bogota D.C, Asociación Colombiana de Hidrogeólogos -CAR 2009.

Gaviria et al. 2010. La vulnerabilidad humana a un posible evento de contaminación de las aguas subterráneas. X Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, ALHSUD. Caracas Venezuela.

--------. 2010. Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas. X Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, ALHSUD. Caracas Venezuela.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). Gestión Integrada de los Recursos Hídricos: Fortalecimiento de las Acciones Locales. En: IV Foro Mundial del Agua Ciudad de México. 2006 Documento Temático. Eje Temático No. 2 Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). Manejo integrado de recursos hídricos. Integrated water resources management. GWP Technical Advisoray Committee, Stockholm, Sweden. 2000. TAC Technical background papers, No. 4.

GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA. Antioquia en cifras. Información subregional y municipal. Departamento Administrativo de Planeación. 2009.

--------. Anuario estadístico de Antioquia 2008. Departamento Administrativo de Planeación. Antioquia, Colombia. 2009.

--------. Atlas Veredal del Departamento de Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación. Antioquia, Colombia. 2007.

--------. Encuesta Calidad de Vida en Antioquia. Departamento Administrativo de Planeación. 2009.

GODFREY, S y SMITH, M. Improved microbial risk assessment of groundwater. En: Hydrogeologycal Journal. 2005. 13: 321-324.

GONCALVES, G y PEREIRA L. M. Integrating geographical information systems and multi-criteria methods: A case study. Annals of Operations Research; 2002. p. 116, 243 – 269.

HERRERO, Ana Carolina y FERNANDEZ, Víctor Leonardo. Planeamiento urbano: marco para la gestión del riesgo poblacional en cuencas. En: X Coloquio internacional de Geocrítica. Universidad de Barcelona. 2008.

INSTITUTO DE ESTUDIOS REGIONALES y UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Bajo Cauca, Desarrollo Regional; una tarea común Universidad – Región. INER; 2003. Informe final.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC). Estudio de suelos del Departamento de Antioquia. IGAC, Bogota. 1979.

LOBO-FERREIRA, J. y OLIVEIRA, M. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. En: Geofísica Internacional. 2004. Vol 43. no 4. p. 541-550.

MARTÍNEZ, Diana Carolina. Propuesta de implementación de metodologías para la evaluación hidrogeoquímica y de calidad de las aguas subterráneas y aplicación a la zona del Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de pregrado Ingeniería Sanitaria. Medellín, Colombia; Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. 2007. 147 p.

MASCREY, Andrew. Los Desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina; 1993. Compilación.

MASSONE, Héctor Enrique. Evaluación y gestión del riesgo de contaminación de acuíferos. En: Curso pautas conceptuales y metodológicas acerca de la evaluación y gestión del riesgo de contaminación de acuíferos. (5: 10-14, Agosto Medellín, Colombia). Memorias. Medellín. Universidad de Antioquia; 2009.

MASSONE, Héctor y MARTÍNEZ, Daniel. Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos. En: Revista Ingenierías. Universidad de Medellín. Colombia. Julio-Diciembre; 2008. Vol. 6. no 12,. p. 9-21. ISSN 1692-3324.

-------. Proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos. Su aplicación en el Sudeste Bonaerense. En: IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano LatinoAméricano sobre temas actuales de hidrología subterránea. (Octubre, Córdoba, Argentina). Actas. Córdoba. Universidad Nacional de Río Cuarto; 2005.

MASSONE, Héctor y SAGUA, Marisa. La integración de la vulnerabilidad social en la evaluación del riesgo de contaminación de acuíferos. En: IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano LatinoAméricano sobre temas actuales de hidrología subterránea. (Octubre, Córdoba, Argentina). Actas. Córdoba. Universidad Nacional de Río Cuarto; 2005.

MEJIA, Oscar Augusto. Técnicas geoestadísticas en Hidrogeología. Caso de Estudio el Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de postgrado, especialización en sistemas de información geográfica. Medellín, Colombia. Universidad de San Buenaventura; 2006. 108 p.

MEJIA, Oscar Augusto; BETANCUR, Teresita y LONDOÑO, Libardo. Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrología del Bajo Cauca antioqueño. En: DYNA, universidad Nacional de Colombia, Medellín. 2007. Edición 152. Vol 74. p. 137-150. ISSN 0012-7353

MINISTERIO DEL AMBIENTE EN COLOMBIA. Sistema de indicadores de sostenibilidad ambiental en el ámbito nacional. Avances y perspectivas. 2002.

MORRIS, B.L. Practical implications of the use of groundwater- protection Tools in water-supply risk assessment. En: J.C CIWEM. 2001. p.265-270.

NACIONES UNIDAS. ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACION LA CIENCIA Y LA CULTURA. Resolución A/Res/58/217. (23, Diciembre, 2003). Por la cual se Proclama el período de 2005 a 2015 Decenio Internacional para la Acción, “El agua, fuente de vida”; Asamblea General; 2004. 2 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Risk assessment in the Federal Goverment. Managing the process. NRC. Washington. USA. 1983. Academic press.

NEOTROPICOS y CORANTIOQUIA. Visión Panzenú. Medellín: Corantioquia; 2001. Informe final.

NGUYET, V.T y GOLDSCHEIDER, N. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and first application in a tropical karst area. En: Hydrogeology Journal. Vietnam; 2006. 14. p. 1666- 1675.

NOBRE. R.C.M et al. Groundwater vulnerability and risk zapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. En: Journal of Contaminant Hydrology. 2007. p. 277-292.

OTHAX, Natalia; PELUSO, Fabio y USUNOFF, Eduardo. Los análisis de riesgo sanitario como herramientas para la gestión de los recursos hídricos en argentina. En: Revista gestión del agua en °. Porto Alegre, Brasil. Julio a Diciembre, 2007. Vol 4. no 2. p. 39-50.

PALACIO, Paola Andrea. Identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de isótopos estables del agua. Caso de estudio Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de postgrado, maestría en ingeniería con énfasis en ambiental. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. 2007. 93 p.

PELUSO, Fabio. Metodología de análisis areal del riesgo sanitario por contaminantes en el agua de bebida para la ciudad de azul, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. 2005. 226 p.

PELUSO, Fabio; OTHAX, Natalia y USUNOFF, Eduardo. Interrelación entre variables socioeconómicas y la calidad del agua bebida para la gestión integral del recurso hídrico. En: III Seminario Hispano-LatinoAméricano de temas actuales de la hidrología subterránea. (4; 16-19, Octubre, Paraná, Argentina) Memorias, Entre Ríos, Universidad Nacional de Entre Ríos; 2006. ISBN 978-987-23936-2-5.

PERLES, María Jesús. Evolución histórica de los estudios sobre riesgos. Propuestas temáticas y metodológicas para la mejora del análisis y gestión del riesgo desde una perspectiva geográfica". Málaga, España; 2004. p. 103-127.

PERLES, Maria Jesús; VIAS, Jesús Maria y ANDREO, B. Vulnerability of human environment to risk: Case of groundwater contamination risk. En: Environment International. Febrero, 2009. Vol 35, issue 2. p. 325-335.

PITA, María Fernanda. Riesgos Catastróficos y Ordenación del Territorio en Andalucía. Sevilla. Junta de Andalucía - Consejería de Obras Públicas y Transportes. 1999. 225. ISBN: 84-8095-174-5.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE ECUADOR. Programa regional andino para la reducción y mitigación de riesgos. Quito, Ecuador. 2005.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO PNUD, Informe Nacional de Desarrollo Humano para Colombia. Conflicto, callejón con salida. Bogota D.C, Septiembre, 2003. 483 p. ISBN 958-97196-7-8

-------. Índice de Desarrollo Humano. New York; 1990.

-------. Informe sobre desarrollo humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático; solidaridad frente a un mundo dividido. Madrid. 2007.

QUIROZ, Mauricio, et al. Los sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo en los estudios hidrogeológicos dos casos de estudio en América Latina. En: Revista Ingenierías. Universidad de Medellín. Colombia. Julio-Diciembre; 2007. Vol. 6. no 11,. p. 23-41. ISSN 1692-3324.

RUEDA, Orfely María y ANGEL, Jorge Emilio. Propuesta metodológica preliminar para calificar la carga contaminante al subsuelo en un acuífero libre. En: IV Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación. (Abril, Lima, Perú). Memorias. Perú; 2004.

RUEDA, Orfely María y BETANCUR, Teresita. Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el Bajo Cauca antioqueño. En: Avances en Recursos Hidráulicos. Medellín, Colombia. 2006. no 13. p. 71-88.

RUEDA, Orfely María. Aplicación y análisis comparativo entre metodologías de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos y parámetros de calidad del agua subterránea en el Bajo Cauca. Trabajo de postgrado, maestría en ingeniería con énfasis en ambiental. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. 2006. 137 p.

SAATY. T y ALEXANDER J. M. Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Process. New York: Praeger. 1989.

SANTA, Diana Patricia. Identificación de interacciones hidrológicas entre el humedal Cienaga Colombia y el acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño mediante técnicas hidroquímicas. Trabajo de postgrado, maestría en ingeniería con énfasis en ambiental. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental. 2009. 118 p.

SISBEN. Base de datos del sistema de identificación y selección de beneficiarios. Cáceres, 2009.

-------. Base de datos del sistema de identificación y selección de beneficiarios. Caucasia, 2009.

UNESCO. Decenio Internacional para la Acción, "El agua, fuente de vida", 2005 – 2015. Asamblea General. 2003.

UNION TEMPORAL COLMAR y CORANTIOQUIA. Estudios y Diseños Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado Urbano municipio de Cáceres. 2007.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA y CORANTIOQUIA. Evaluación hidrogeológica entre los municipios de Caucasia y Cáceres. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia; 2003. Informe final.

-------. Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos al norte del municipio de Caucasia. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia; 2004. Informe final.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA y CORANTIOQUIA. Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos en la cuenca del Río Caserí. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia; 2005. Informe final.

-------. Validación del modelo conceptual de los acuíferos en la Dirección Territorial Panzenú. Medellín, Colombia. 2006. Informe final del convenio interinstitucional 5878. 104 p.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, CORPOMOJANA y CORANTIOQUIA. Determinación de los niveles de mercurio en agua, sedimentos, tejido vivo (humanos, peces y buchón) en los humedales de la mojama sucreña y en algunas fuentes de la jurisdicción de Corantioquia. Convenio Interadministrativo 324 de 2008. Informe final.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Hydrochemical and isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca antioqueño. Organismo Internacional de Energía Atómica. 2007. Contrato 14031.

-------. Operación de red de monitoreo de calidad y cantidad del agua subterránea en la zonas con exploración hidrogeológica en los municipios de Caucasia y Cáceres. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA). Inédito. 2009

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA e INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES. Indicadores e índices ambientales. Marco teórico de indicadores. Programa de información e indicadores de gestión de riesgos de desastres naturales. Manizales, Colombia; 2003. Ejecución del componente II, Indicadores de gestión del riesgo.

-------. Sistema de Indicadores para la gestión del riesgo de desastres. Programa para América Latina y el Caribe. Manizales, Colombia. 2005. Informe Técnico principal.

UNIVERSIDAD NACIONAL y CORANTIOQUIA. Mapa de suelos del Departamento de Antioquia. Medellín, Colombia. 2002.

-------. Mapa geomorfológico del Departamento de Antioquia. Medellín, Colombia. 2002.

VIAS, Jesús María. Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España. Tesis Doctoral. Málaga, España. Universidad de Málaga, Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. 2005. 458 p.

VRBA, J. y ZAPOROZEC, A. Guidebook on zapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists; 1994. Vol 16, ISBN 3-922705-97-9.

WILCHES-CHAUX, Gustavo. Pensar globalmente, la vulnerabilidad global. En: Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina; 1993. p. 11-44.

WORLD BANK. World Development Indicators. Environmental Indicators. 2001.

ZAPOROZEC, A. Contaminant source inventory. En: Zaporozec, A. (ed.) Groundwater contamination inventory. A methodological guideline. Paris, Francia: UNESCO. 2001.

Enlaces electrónicos

www.sciencedirect.com

http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/index.php?option=com_content&view=article&id=75&Itemid=72

http://www.gobant.gov.co/antioquiaencifras/

http://www.antioquia.gov.co/anuarioestadistico2008/index.html

www.corantioquia.gov.co

http://www.minambiente.gov.co/sisa/capítulos_1_4/cap_2/cap2a.htm

http://hdr.undp.org/es/desarrollohumano/

http://web.worldbank.org/

http://www.desenredando.org/public/varios/2001/ehrisusd/index.html,

http://www.epa.gov/espanol/

www.gwpforum.org/

www.imacmexico.org/

www.worldbank.org/wdi2001/environment.htmS

www.elsevier.com/locate/enggeo

Este libro se terminó de imprimir en el 2011

Hace solo un par de décadas las aguas subterráneas solo tenían presencia importante en el Urabá Antioqueño y los mejores acuíferos eran los del valle del Cauca y los de la Sabana de Bogotá. Por fortuna hay cosas que cambian positivamente, la humanidad como conjunto, reconoce hoy la importancia de las aguas subterráneas, no solo porque representan la casi totalidad del agua dulce líquida disponible en la tierra; sino porque hemos sabido reconocer en un recurso oculto a nuestros ojos, la posibilidad de comprender la intrincada trama de la vida y del agua.

Hemos aprendido que todos debemos saber que este recurso existe aunque no se vea, y que las aguas subterráneas siguen siendo un mundo mágico pero que no está reservado a zahories o científicos exóticos; sino que debe hacer parte del mundo de la cultura del agua en la que cabemos todos, que su gestión no puede hacerse a pesar de la gente sino con la gente; que en nuestra región somos afortunados con la presencia de esta reserva natural sobre la cual hemos caminado durante tantos años y que solo recientemente, con la guía de maestros sencillos y decididos, empezamos a ver y a comprender.

Este par de trabajos de investigación que aquí se presentan, se ocupan de la interdependencia de las aguas superficiales y las subterráneas y de la necesidad de proteger los acuíferos integrándolos a la planificación ambiental y territorial.

CORANTIOQUIA

Carrera 65 No 44 A 32
PBX: 493 88 88
Fax: 493 88 00
Linea verde: 01 8000 414123
corantioquia@corantioquia.gov.co
www.corantioquia.gov.co
Medellín - Colombia