

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA  
HÍDRICO SUBTERRÁNEO EN EL ÁREA DEL ANTIGUO  
RELLENO SANITARIO DE NAVARRO (SANTIAGO DE  
CALI, COLOMBIA)**

Maestrando  
**Ing. John Jairo Márquez Molina**

Director  
**Msc. Ing. Marcela Pérez**

Codirector  
**Ing. Omar Azcuntar**



**Universidad Nacional del Litoral**  
**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**  
**Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos**



Santa Fe, Argentina, 2011

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA  
HÍDRICO SUBTERRÁNEO EN EL ÁREA DEL ANTIGUO  
RELLENO SANITARIO DE NAVARRO (SANTIAGO DE  
CALI, COLOMBIA)**

Maestrando  
**Ing. John Jairo Márquez Molina**

Trabajo de tesis presentado ante el Comité  
Académico de Postgrado para optar al título de  
Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Directora  
**Msc. Ing. Marcela Pérez**

Codirector  
**Ing. Omar Azcuntar**

**Universidad Nacional del Litoral**  
**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Santa Fe, Argentina, 2011



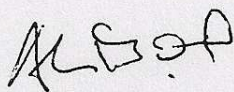


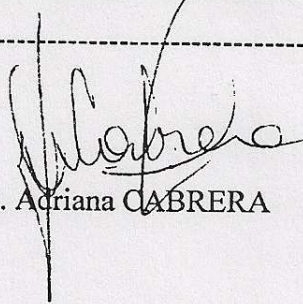
## ACTA DE EVALUACIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

En la ciudad de Santa Fe, a los dieciséis días del mes de diciembre del año 2011, se reúnen en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos titulada *“Análisis del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en el área del antiguo relleno sanitario de Navarro (Santiago de Cali, Colombia)”*, desarrollada por el Ing. John Jairo MARQUEZ MOLINA, Pas. N° 16.459.085. Ellos son, el Dr. Edgardo Albouy, la Dra. Adriana Cabrera y el Dr. Eduardo Kruse. Se cuenta, además, con la presencia de la Directora de Tesis, Mag. Marcela Pérez-----

Escuchada la Defensa Pública y evaluada la Tesis, el Jurado resuelve: *aprobar la tesis presentada. Ello se fundamenta en que se trata de un aporte original para el tratamiento hidrogeológico de un relleno sanitario con un sólido conocimiento del área y del tema en estudio. Los objetivos fueron claramente planteados y se siguió con una metodología adecuada para la obtención de los resultados. Las conclusiones y recomendaciones constituyen una herramienta de importancia para los encargados de la gestión del recurso hídrico de la región. La exposición fue clara, demostrando un buen manejo del tema y respuesta con solvencia a las consultas realizadas por el jurado. Por lo expuesto el jurado resuelve aprobar la tesis presentada con la calificación de 10. SOBRESALIENTE*

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente -----

  
Dr. Edgardo ALBOUY

  
Dra. Adriana CABRERA

  
Dr. Eduardo KRUSE

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Santa Fe, 16 de diciembre de 2011

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada *“Análisis del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en el área del antiguo relleno sanitario de Navarro (Santiago de Cali, Colombia)”*, desarrollada por el Ing. John Jairo MARQUEZ MOLINA, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Dr. Edgardo ALBOUY

Dra. Adriana CABRERA

Dr. Eduardo KRUSE

Santa Fe, 16 de diciembre de 2011

Certifico haber leído esta Tesis preparada bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Ing. Omar AZCUNTAR  
Codirector de Tesis

Mag. Marcela PÉREZ  
Directora de Tesis

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas  
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar



## **Declaración legal del Autor**

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté disponible a sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca.

Citaciones breves de esta disertación son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para la citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán concebidos por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

## **Dedicatoria**

*A mi esposa Gloria Marcela, por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos.*

*A Jairo, E, Yolanda y Diana y demás familiares por brindarme su apoyo emocional y espiritual desde la distancia en esta etapa de mi vida.*



## **Agradecimientos**

- Agradecimientos a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, y docentes que participaron en mi formación de Magíster.
- A la Mag, Ing. Marcela Pérez, por sus constantes aportes, comentarios y sugerencias en el desarrollo de este trabajo y contribuciones a mi crecimiento profesional. Gracias por confiar en mis capacidades desde el principio.
- Al grupo de Aguas subterráneas de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, en especial al Ing. Omar Azcuntar, Ing. Ruber Rengifo y Ing. Maria Mercedes Gutiérrez, por su colaboración y tiempo.
- A la Dra. Claudia M. Sainato y Dra. Griselda Galindo por su apoyo emocional y contribuciones académicas y profesionales.
- Y a todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo, Muchas Gracias.

## Índice General

<b>Capítulo 1: Introducción</b>	1
1.1 Consideraciones Generales	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Contenido de la Tesis	3
<b>Capítulo 2: Área de Estudio</b>	6
2.1 Ubicación y Características generales del área de estudio	6
2.2 Hidrometeorología	9
2.3 Hidrología superficial	12
2.4 Marco Geológico Regional	14
2.5 Estratigrafía	15
2.6 Geología Superficial Local y Geomorfología	19
2.7 Geofísica	25
2.8 Marco Hidrogeológico Regional	28
2.9 Calidad de las aguas subterráneas	30
<b>Capítulo 3: Procesamiento y análisis de la información</b>	32
3.1 Información cartográfica e implementación de un SIG	32
3.2 Inventario de puntos de agua (Pozos de Bombeo y Monitoreo)	39
3.3 Evolución de Niveles Estáticos	40
3.4 Balance hídrico	47
3.5 Balance de lixiviados	51
3.6 Procesamiento de información hidroquímica	56
<b>Capítulo 4: Modelo conceptual de funcionamiento</b>	70
4.1 Metodología Propuesta	70
4.2 Hidrogeología del área de estudio	70
4.3 Parámetros hidráulicos formacionales	76



---

4.4 Dirección del escurrimiento subterráneo	77
4.5 Entradas y salidas de agua del sistema	79
4.6 Calidad del agua subterránea en la zona de influencia del relleno sanitario	80
4.7 Dominio del sistema (Geometría y límites)	83
<b>Capítulo 5: Implementación del modelo de flujo</b>	<b>85</b>
5.1 Aspectos Generales	85
5.2 Discretización: Diseño de la malla del modelo	88
5.3 Asignación de propiedades del acuífero	90
5.4 Asignación de las condiciones de borde	92
5.5 Condiciones de ejecución del modelo de flujo	96
5.6 Calibración del modelo de flujo	96
5.7 Modelo numérico local	100
5.8 Balance de masas	103
5.9 Resultados del modelo de flujo	106
5.10 Análisis de Sensibilidad	109
<b>Capítulo 6: Implementación del modelo de transporte de contaminantes</b>	<b>115</b>
6.1 Aspectos Generales	115
6.2 Escenarios de transporte propuestos	117
6.3 Parámetros básicos y condiciones de borde para el transporte	119
6.4 Asignación de fuentes de contaminación	123
6.5 Resultados del modelo de transporte	124
6.6 Propuesta de ampliación de red de pozos de monitoreo	132
<b>Capítulo 7: Evaluación de alternativas de remediación</b>	<b>134</b>
7.1 Objetivos de la remediación	134
7.2 Alternativa 1: Sistemas de pozos de bombeo	135
7.3 Alternativa 2: Sistema de zanja interceptora	137
7.4 Alternativa 3: Barreras impermeables con compuerta geoquímica	138
7.5 Comparación de alternativas evaluadas	142
<b>Capítulo 8: Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>144</b>

---

<b>Listado de Anexos</b>	151
Anexo 1. Diferencias de cotas de terreno de puntos de agua	152
Anexo 2. Instalación del SIG	153
Anexo 3. Mapa de localización de puntos de agua seleccionados	154
Anexo 4. Cota de la superficie de agua de los principales cursos del área	155
Anexo 5. Nivel del agua superficial para el modelo inicial de flujo	157
Anexo 6. Variación de parámetros – Análisis de sensibilidad	158
Anexo 7. Localización (X, Y) de pozos de monitoreo propuestos	160
<b>Referencias Bibliográficas</b>	161



## Índice de Figuras

Figura 2.1	Ubicación de la ciudad de Cali, Valle del Cauca, Colombia	6
Figura 2.2	Localización del relleno de Navarro e identificación de los diferentes cerros	7
Figura 2.3	Precipitación media mensual – Estación Meléndez – CENICAÑA	10
Figura 2.4	Evaporación media mensual – Estación Meléndez – CENICAÑA	11
Figura 2.5	Temperatura media multianual – Estación Meléndez CENICAÑA	11
Figura 2.6	(a) Humedad Relativa y (b) Radiación solar – Estación Meléndez	12
Figura 2.7	Localización de cuerpos de agua superficial en la zona de estudio	14
Figura 2.8	Perfiles estratigráficos sector norte de Navarro	16
Figura 2.9	Columna Litoestratigráfica pozo Vc-817	18
Figura 2.10	Principales Unidades Geológicas Superficiales	24
Figura 2.11	Vista en planta de los perfiles geoeléctricos y línea PEH	25
Figura 2.12	Perfiles Geoeléctricos en el sector de Navarro	26
Figura 2.13	Línea PEH con arreglo dipolo-dipolo en el Sector de Navarro	28
Figura 3.1	Proceso de unificación de sistema topográfico y DEM	35
Figura 3.2	Ventana principal de la aplicación “zona_estudio.apr”	37
Figura 3.3	Distribución por usos de pozos profundos	39
Figura 3.4	Localización y distribución de pozos de monitoreo	40
Figura 3.5	Evolución temporal de niveles estáticos	41
Figura 3.6	Localización de niveles de agua superficial en ríos	43
Figura 3.7	Niveles estáticos, direcciones de flujo y gradientes hidráulicos – Antiguo relleno de Navarro	46
Figura 3.8	Esquema del volumen de control y variables consideradas en el balance	48
Figura 3.9	Balance hídrico estación Meléndez (CENICAÑA)	51
Figura 3.10	Esquema del balance hídrico en un relleno sanitario	52
Figura 3.11	Producción de lixiviados para cada uno de los rellenos sin clausurar	55
Figura 3.12	Producción de lixiviados para cada uno de los rellenos clausurados	56
Figura 3.13	Diagramas de Piper – Red de monitoreo Navarro.	59
Figura 3.14	Evolución temporal de parámetros físico-químicos (a) Conductividad eléctrica (CE) (b) Sólidos disueltos totales (TDS) y (c) Bicarbonatos.	62

Figura 3.15 Evolución temporal de parámetros físico-químicos (a) Cloruros, (b) Sulfatos y (c) Magnesio	64
Figura 3.16 Distribución y perfiles de concentraciones de Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	66
Figura 3.17 Distribución y perfiles de conductividad eléctrica (CE)	68
Figura 4.1 Corte estratigráfico – Corte D-D' Dirección Sur – Norte.	72
Figura 4.2 Localización de perfiles complementarios.	73
Figura 4.3 Perfil complementario M-M' – Dirección SO-NE	74
Figura 4.4 Perfil complementario N-N' – Dirección N-S	75
Figura 4.5 Superficies límites y capas a considerar en el modelo conceptual	75
Figura 4.6 Mapa de líneas de iso-transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	77
Figura 4.7 Mapa de isopiezas, dirección de flujo y gradiente hidráulico	78
Figura 4.8 Esquema de modelo conceptual propuesto	80
Figura 4.9 Focos de contaminación por lixiviados detectados	81
Figura 4.10 Extensión y límites del dominio del sistema	84
Figura 5.1 Diagrama de flujo de etapas para la construcción del modelo de flujo y transporte	86
Figura 5.2 Discretización horizontal de la zona de estudio	88
Figura 5.3 Sección transversal y longitudinal de las capas del modelo	89
Figura 5.4 Distribución de conductividades hidráulicas por capa	91
Figura 5.5 Condiciones de borde establecidas en el modelo	95
Figura 5.6 Nueva distribución de la conductividades hidráulicas Capa 2	97
Figura 5.7 Correlación de niveles calculados vs. observados – Modelo inicial	99
Figura 5.8 Dominio del modelo local y discretización de la malla	101
Figura 5.9 Condiciones de borde modelo local	102
Figura 5.10 Correlación de niveles calculados vs. observados – Modelo local.	103
Figura 5.11 Balance de masa general del sistema local	104
Figura 5.12 Porcentaje de entrada y salida de flujo por zonas	105
Figura 5.13 Mapa de contorno de niveles calculados vs observados y vectores de velocidad de flujo	107
Figura 5.14 Perfil equipotenciales y vectores de velocidad de flujo – Fila 73	107
Figura 5.15 Seguimiento de partículas desde los cerros y Madre Vieja	108



Figura 5.16 Perfil de rastreo de partículas cerros Antiguo, Hospitalario y Madre Vieja – Fila 73	109
Figura 5.17 Localización de perfiles de niveles equipotenciales	110
Figura 5.18 Comparación del comportamiento de niveles equipotenciales en los perfiles – variación de conductividad hidráulica (K)	111
Figura 5.19 Comparación de flujos de entrada y salida – variación de conductividad hidráulica (K)	112
Figura 5.20 Comparación del comportamiento de niveles equipotenciales en los perfiles – variación S y P	113
Figura 5.21 Comparación de flujos de entrada y salida – variación de S y P	114
Figura 6.1 Asignación de concentración inicial y celdas inactivas para el transporte	123
Figura 6.2 Fuentes de concentración de escenarios de transporte	124
Figura 6.3 Pluma de concentración de cloruros - Escenario 1 (Concentración constante: Cerros Antiguo y Hospitalario)	126
Figura 6.4 Pluma de concentración de cloruros - Escenario 2 (Atenuación natural en 100 Años: cerros Antiguo y Hospitalarios)	127
Figura 6.5 Pluma de concentración de cloruros - Escenario 3 (Atenuación natural en 50 Años: cerros Antiguo y Hospitalario)	129
Figura 6.6 Pluma de concentración de cloruros - Escenario 4 (Fuentes contaminantes: Cerros Antiguo, Hospitalario y Madre Vieja – hasta 100 Años)	130
Figura 6.7 Pluma de concentración de cloruros - Escenario 5 (Fuentes contaminantes: Cerros Antiguo, Hospitalario y Lagunas – hasta 100 Años)	131
Figura 6.8 Localización de pozos de monitoreo existente y propuestos para pluma de contaminación generada desde Navarro	133
Figura 7.1 Alternativas de pozos de bombeo (a) Batería 6 pozos base de cerros, Batería 3 pozos, (b) Batería 2 pozos zona intermedia, Batería 3 pozos	136
Figura 7.2 Zanjas interceptoras	138
Figura 7.3 Esquema general de funcionamiento de una PRB	139
Figura 7.4 Barreras impermeable – configuración de 2 barreras con 1 compuerta PRB	140
Figura 7.5 Barrera permeable – configuración de 2 barreras con 3 compuertas PRB	141

## Índice de Tablas

Tabla 3.1 Descripción de las capas temáticas desarrolladas	38
Tabla 3.2 Localización y registro de niveles estáticos pozos de monitoreo.	44
Tabla 3.3 Cálculo del balance hídrico mensual (mm/mes) - Período (1994-2010).	50
Tabla 3.4 Generación de lixiviados en los rellenos sin clausurar (anual).	54
Tabla 3.5 Volumen de lixiviados en los rellenos sin clausurar (mensual).	54
Tabla 3.6 Calculo del balance hídrico rellenos clausurados	55
Tabla 3.7 Volumen de lixiviados en los rellenos clausurados (mensual).	56
Tabla 4.1 Parámetros hidráulicos formacionales y características específicas	76
Tabla 4.2 Caracterización de lixiviados	82
Tabla 5.1 Conductancias iniciales y finales para las fronteras río.	99
Tabla 5.2 Conductancias fronteras río modelo local.	103
Tabla 5.3 Balance de masa general.	105
Tabla 5.4 Balance de masa por zonas.	106
Tabla 6.1 Distribución de concentraciones de cloruro (Cl-) - Escenario 2	118
Tabla 6.2 Distribución de concentraciones de cloruro (Cl-) - Escenario 3	119
Tabla 7.1 Comparación de alternativas de remediación evaluadas.	142

## Resumen

La disposición final de residuos sólidos urbanos sigue siendo, en la actualidad, un tema de gran preocupación en una comunidad. Una de las principales problemáticas que plantean los sitios en los cuales se vierten estos residuos es la afectación que pueden producir sobre la calidad del agua subterránea del área adyacente a los mismos. La situación se maximiza si estos vertederos no han sido acondicionados para tal fin. Esta problemática se encuentra presente en la Ciudad de Cali, sur-occidente de Colombia, donde -desde fines de la década de 1960- los residuos sólidos urbanos se disponen en un volcadero a cielo abierto, conocido comúnmente como “Basuro de Navarro”. En el caso particular de dos de los cerros que componen este depósito, su emplazamiento y crecimiento se produjo obviando la consideración de los diversos factores dependientes tanto de la tipología del vertido como de las características hidrogeológicas del medio receptor. A pesar de la trascendencia del tema, hasta el momento no se había encarado un estudio integral, que tuviera en cuenta los distintos aspectos relacionados a la disciplina hidrogeológica, necesarios para caracterizar el estado del sistema hídrico subterráneo y su posible afección debido a la emisión continua de la carga contaminante producto de este relleno. Es por ello, que en esta Tesis de Maestría se presenta una evaluación del estado y del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo, subyacente al área del antiguo relleno sanitario de Navarro, con el objetivo de evaluar su respuesta ante el posible impacto de los lixiviados generados a partir de dos de los cerros que lo componen. La respuesta del sistema acuífero se simuló con los códigos numéricos *Modflow*, *Modpath* y *MT3D*. Para este último se seleccionó -de entre los componentes derivados del lixiviado- al cloruro, ya que es un elemento considerado conservativo e indicativo de un deterioro identificable de la calidad del acuífero. Como resultado de la simulación se evidencia la generación de una pluma a partir del antiguo relleno sanitario de Navarro con dirección hacia el cauce del Río Cauca. Ante esta situación se comprobó la factibilidad de tres diferentes alternativas de remediación con el propósito de brindar, a los distintos organismos competentes en la temática, los fundamentos científicos necesarios para plantear y desarrollar estrategias de manejo y gestión del agua subterránea en la zona de estudio.

**Palabras Claves:** Acuífero, Cali (Colombia), relleno sanitario, simulación de flujo y transporte.



## Abstract

The disposal of solid waste remains today, an issue of great concern in a community. One of the main problems posed by the sites where the waste is dumped involves the deterioration of the groundwater quality of the area adjacent to them. The situation is maximized if these landfills have not been prepared for this purpose. This problem is present in the city of Cali, south-western Colombia, where –since the late 1960s– urban solid wastes are disposed in an open digging, popularly known as “Basuro de Navarro”. In the particular case of two of the hills that comprise this deposit, their location and growth occurred ignoring the various factors depending both on the type of the spill and the hydrogeological characteristics of the porous media. Despite the relevance of the subject, until now no comprehensive study that takes into account the different aspects related to the state of the groundwater system and its possible condition due to the continuous emission of a contaminant load was undertaken. Therefore, this Thesis provides an assessment of the state and functioning of the groundwater system that underlies the area of the former Navarro landfill in order to evaluate its response to the potential impact of the leachate generated from two of the hills that comprise it. The response of the aquifer system was simulated with the codes *MODFLOW*, *MODPATH* and *MT3D*. For the latter, among the leachate-derived constituents, chloride was selected. It is considered non-reactive, and indicative of a readily-identifiable deterioration of the groundwater quality. As a result of the simulation, the origin of a plume from the former Navarro landfill toward the bed of the Cauca River was shown. Faced with this situation, the feasibility of three different remediation alternatives were tested out. They have the purpose of providing to the various agencies with the scientific basis needed to create and develop management strategies for the groundwater in the study area.

**Keywords:** Aquifer, Cali (Colombia), landfill, flow and transport simulation.

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1 Consideraciones Generales

La disposición final de residuos sólidos urbanos sigue siendo, en la actualidad, un tema de gran preocupación en una comunidad. Una de las principales problemáticas que plantean los sitios en los cuales se vierten estos residuos es la afectación que pueden producir respecto a la calidad de las aguas subterráneas del área adyacente a los mismos. La situación se maximiza si estos vertederos no han sido acondicionados para tal fin; es decir, no cuentan con los requerimientos ingenieriles mínimos que impidan la fuga de lixiviados.

La producción de lixiviados en un relleno sanitario es función de diversos factores como por ejemplo: precipitación en el área del relleno, superficie del predio, permeabilidad de los materiales subyacentes y humedad del residuo. Desde el punto de vista de su localización, estos lixiviados, al alcanzar un medio poroso saturado, constituyen una fuente de contaminación puntual. Sin embargo, al considerar la escala temporal, la fuente es de emisión continua, ya que seguirá impactando durante un período de tiempo aún más prolongado al de la fecha de cierre del vertedero (Martínez *et al.*, 2002; Bocanegra *et al.*, 2004; Herráez Sánchez de las Matas *et al.*, 2001, López Gutiérrez *et al.*, 2002, Moreno *et al.*, 2004).

Esta problemática se encuentra presente en la Ciudad de Cali, Colombia, donde -desde fines de la década de 1960- los residuos sólidos urbanos se disponen en un volcadero a cielo abierto, conocido comúnmente como “Basuro de Navarro”. El crecimiento espontáneo e indiscriminado de este depósito se produjo obviando la consideración de los diversos factores dependientes tanto de la tipología del vertido como de las características hidrogeológicas del medio receptor.

Por tal razón, y dado que el lugar de emplazamiento del relleno se encuentra junto a un antiguo paleocauce y sobre uno de los principales mantos acuíferos del municipio de Cali, es que se ha seleccionado el sitio como caso de estudio.

En este sentido, el recurso hídrico subterráneo que subyace al área es utilizado para el abastecimiento público en barrios y zonas hortícolas aledañas al relleno, y es considerado como el de mayor disponibilidad y potencialidad para el desarrollo del municipio. A ello debe agregarse el hecho de que: a) la zona cuenta con precipitaciones abundantes, mayores a 1300 mm/año; b) los depósitos sedimentarios subyacentes poseen una conductividad hidráulica promedio del orden de 25 m/día, presentado en algunas zonas gran heterogeneidad; c) dependiendo de la época del año y régimen hidrológico existen niveles freáticos someros, localizados a menos de 2 m de profundidad desde la superficie del terreno; d) la zona no saturada presenta espesores que varían entre los 2 y 4 m; e) en función de la dirección general del escurrimiento subterráneo, y la topografía del área, el “Basuro de Navarro” se encuentra en el sentido de un gradiente hidráulico decreciente.

Además de lo subrayado en el párrafo precedente, 7 km aguas abajo del relleno, a orillas del río Cauca, principal cuerpo de agua superficial del área, se encuentra la toma de agua que satisface los requerimientos hídricos del 70% de la población de la ciudad de Cali.

A pesar de la trascendencia del tema, y de las tareas de campo llevadas a cabo por distintos organismos relacionados con los recursos hídricos y el medio ambiente de la ciudad de Cali, hasta el momento no se había encarado un estudio integral, que tuviera en cuenta los distintos aspectos relacionados a la disciplina hidrogeológica, necesarios para caracterizar el estado del sistema hídrico subterráneo y su posible afección debido a la emisión continua de la carga contaminante producto de este relleno.

Es por ello que resulta relevante conocer el funcionamiento de este sistema acuífero, diagnosticar su estado actual y estimar su posible evolución espacio-temporal. Esta caracterización brinda, a los distintos organismos competentes, el fundamento necesario para plantear y desarrollar estrategias de manejo y gestión del agua subterránea en la zona de estudio.



## 1.2 Objetivos

El **objetivo general** de esta propuesta de tesis de maestría es contribuir al conocimiento del estado actual del sistema acuífero subyacente al área del antiguo relleno sanitario de Navarro, Santiago de Cali, Colombia, llamado comúnmente Basuro de Navarro, como consecuencia de la interacción directa entre su dinámica intrínseca y la acción del hombre.

Se plantean como **objetivos particulares**:

- Caracterizar hidrogeológicamente el medio físico en el área del antiguo relleno sanitario de Navarro;
- Evaluar la respuesta del sistema a los lixiviados producidos por este vertedero de residuos sólidos; y
- Representar la posible trayectoria del agua percolada a través de estos residuos.

## 1.3 Contenido de la Tesis

Para dar cumplimiento a los objetivos anteriormente enunciados se propuso el siguiente plan de actividades:

Actividad 1: Recopilación, sistematización y análisis de bibliografía temática específica.  
Recolección y análisis de los datos disponibles.

Actividad 2: Procesamiento y análisis de información temática antecedente: cartografía, geología, hidrometeorología, hidrogeología, hidroquímica.

Actividad 3: Definición del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero.

Actividad 4: Implementación y calibración del modelo matemático de flujo y transporte del sistema.

Actividad 5: Simulación de escenarios.

Actividad 6: Análisis de los resultados. Conclusiones y recomendaciones.

Actividad 7: Redacción del trabajo de tesis.

Para la redacción del Trabajo de Tesis, el Plan de Actividades fue organizado en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: INTRODUCCION.**  
Se presenta el tema de Tesis, sus antecedentes, los objetivos, y la organización de la misma.
- **Capítulo 2: AREA DE ESTUDIO.**  
En base a información antecedente se describen las características generales y particulares del área de estudio.
- **Capítulo 3: PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.**  
Sobre la base de la información recopilada, se realizan diferentes etapas de análisis que contemplan, fundamentalmente, aspectos de carácter hidrogeológico e hidroquímico.
- **Capítulo 4: MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO.**  
Luego de la caracterización del medio físico, a través del procesamiento y análisis de la información disponible, se procede a la formulación del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero. En este modelo se establecen, además, las relaciones e interdependencias de los distintos componentes del ciclo hidrológico que resultan relevantes en el área de estudio.
- **Capítulo 5: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE FLUJO.**  
Sobre la base del modelo conceptual previamente definido se implementa un modelo matemático que, mediante la solución numérica de las ecuaciones de flujo, por el método de diferencias finitas, permite representar y predecir el comportamiento del sistema acuífero.
- **Capítulo 6: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES.**  
A partir de los resultados obtenidos con el modelo del flujo, se implementó un modelo de transporte. Para ello se seleccionó -de entre los componentes derivados del lixiviado- al cloruro, ya que es un elemento considerado conservativo e indicativo de un deterioro identificable de la calidad del agua subterránea.
- **Capítulo 7: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN**  
Una vez finalizada la etapa de implementación de los modelos de flujo y transporte, se proponen, de manera general, tres diferentes alternativas

de remediación con el propósito de brindar, a los distintos organismos competentes en la temática, los fundamentos científicos necesarios para plantear y desarrollar estrategias de manejo y gestión del agua subterránea en la zona de estudio.

- **Capítulo 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se sintetizan los resultados más significativos producidos durante el desarrollo de esta Tesis y se proporciona una serie de recomendaciones atendiendo a cada una de las etapas desarrolladas en la misma.

En los ANEXOS se presenta:

*Anexo 1. Diferencias de cotas de terreno de puntos de agua*

*Anexo 2. Instalación del SIG*

*Anexo 3. Mapa de localización de puntos de agua seleccionados*

*Anexo 4. Cota de la superficie de agua de los principales cursos del área*

*Anexo 5. Nivel del agua superficial para el modelo inicial de flujo*

*Anexo 6. Variación de parámetros – Análisis de sensibilidad*

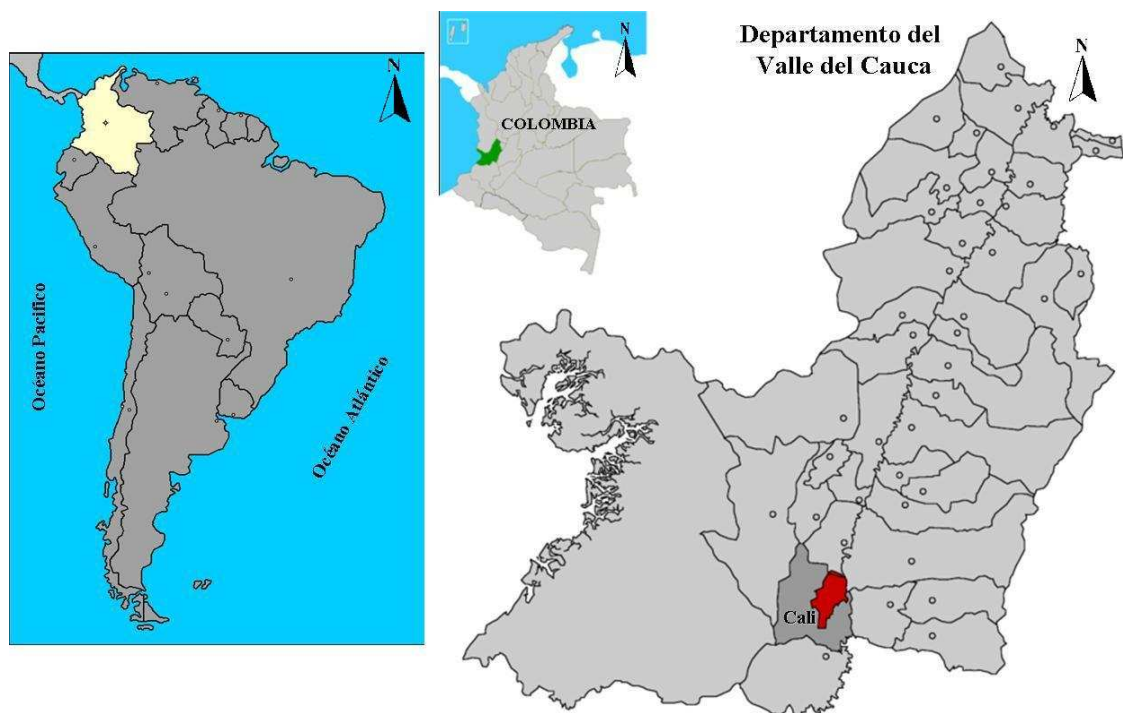
*Anexo 7. Localización (X, Y) de pozos de monitoreo propuestos*

En el ítem REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS se consignan las obras que han sido consultadas para la confección de este Trabajo de Tesis.

## Capítulo 2: Área de Estudio

### 2.1 Ubicación y Características generales del área de estudio

La ciudad de Cali está localizada al suroeste de Colombia, en el Departamento del Valle del Cauca (Figura 2.1). Tiene una población aproximada de 2.400.000 habitantes y, de acuerdo a información disponible, genera 1.800 toneladas diarias de residuos (año 2008), los que fueron dispuestos indiscriminadamente durante 41 años en un basurero a cielo abierto.



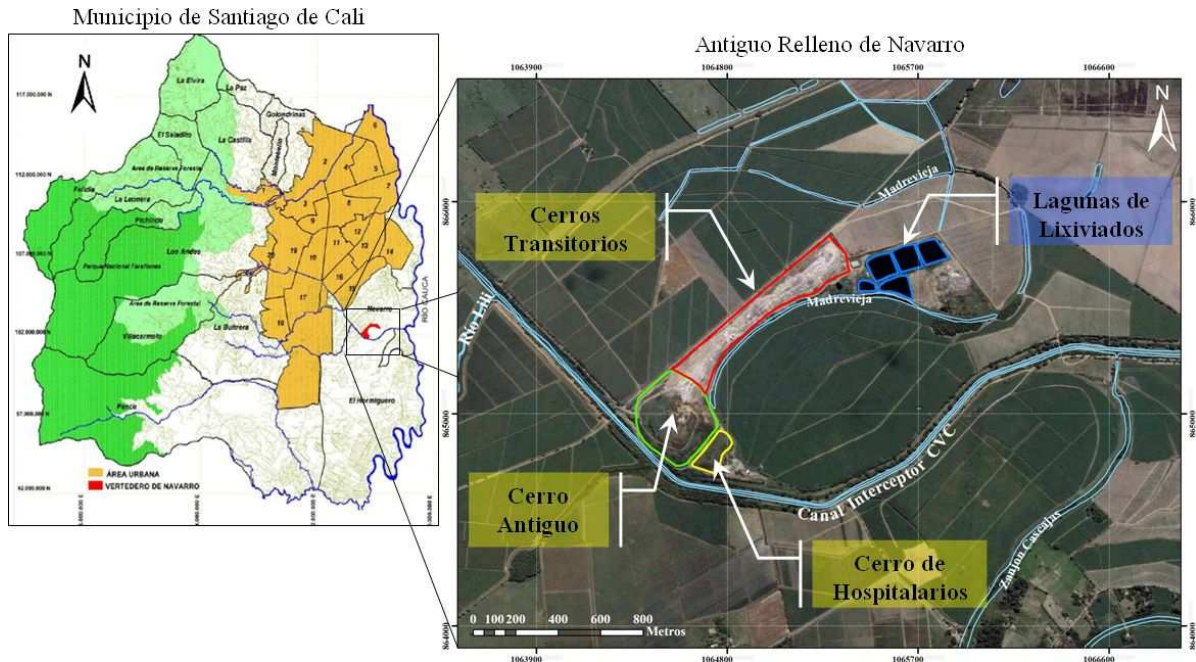
**Figura 2.1 Ubicación de la ciudad de Cali, Valle del Cauca, Colombia**

La disposición final de los residuos urbanos comienza en el año 1968 cuando la Empresa de Servicios Varios EMSIRVA ESP, creada como organismo autónomo para ocuparse del aseo de la ciudad, utiliza una excavación ya existente (realizada con fines de préstamo) en el antiguo cauce (*Madrevieja*) del Río Cauca<sup>1</sup>. Esta excavación a cielo abierto, cuya superficie inicial aproximada fue de 5 ha y 20 m de profundidad, funcionó como “Relleno

<sup>1</sup> La madreveja del Río Cauca fue protegida por la Convención Ramsar sobre Humedales de 1971, y ratificada por Colombia mediante la Ley 357 de 1997.



Sanitario”, sin ningún tipo de protección o diseño (Collazos, 2001) hasta el año 1976, año en el cual se continuaron depositando los residuos en una zona aledaña no excavada (EMSIRVA, 2002). Es así que, con el transcurrir de los años, el área ocupada por este sitio alcanzó unas 26 ha, distribuidas en un botadero antiguo (objeto de este estudio) y una serie de rellenos sanitarios transitorios contiguos al primero (Figura 2.2).



**Figura 2.2 Localización del relleno de Navarro e identificación de los diferentes cerros**

El botadero antiguo, conocido popularmente como “*Basuro de Navarro*” se encuentra ubicado en el corregimiento de Navarro, al sur oriente de la ciudad de Cali, entre las coordenadas:

$$\begin{array}{ll} X_{\text{mín}}: 1.059.799 & X_{\text{máx}}: 1.069.157 \\ Y_{\text{mín}}: 859.939 & Y_{\text{máx}}: 870.439 \end{array}$$

Del sistema de coordenadas planas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia con proyección *Oeste - Quibdo*. La altura promedio de la zona perimetral del botadero es de 966 m.s.n.m (cota de la base).

Este botadero antiguo, que alcanzó unos 68 m sobre el nivel del río, está conformado por dos cerros de residuos separados por una línea de transmisión eléctrica de alta tensión (Serviambientales, 2000; CVC, 2004) (Figura 2.2). Algunas características de estos cerros son:

- *Cerro Antiguo*: Es el cerro mayor, ocupa una superficie de 12 ha y una altura aproximada de 52 m, desde la superficie del terreno. Operó desde el 1° de Septiembre de 1970 hasta el 31 de Septiembre de 2001 (31 años y 1 mes); recibió 9.865.652 ton de basura y, de acuerdo a Collazos (2004) seguirá produciendo lixiviados y gases hasta el año 2016. Este cerro no se encuentra impermeabilizado, aunque con el pasar de los años se realizaron algunas adecuaciones como drenajes para aguas lluvias y un filtro francés en la base inferior del talud construido en el año 2002 para recolectar parte del lixiviado generado.
- *Cerro Hospitalario*: Es el cerro menor del botadero antiguo ocupando unas 2 ha aproximadamente. Operó en el mismo período que el Cerro Antiguo y no existe información clara acerca de la cantidad de residuos que recibió. Como su nombre lo indica, se puede inferir que los residuos depositados allí provenían de servicios de salud. Este cerro tampoco se encuentra impermeabilizado.

El Relleno Sanitario Transitorio se desarrolló en dos fases y cuatro alternativas adicionales de ampliación y adecuación. Este relleno fue diseñado y construido siguiendo las especificaciones técnicas por lo cual cuenta con impermeabilización, red de tuberías en la base para la recolección de lixiviados y lagunas para su almacenamiento, drenaje de aguas lluvias y chimeneas para la extracción de gases. Algunas características de las fases y alternativas del Relleno Transitorio son:

- *Fase I*: Está formada por 3 vasos; tiene una superficie en planta de 5,44 ha y una capacidad de 628.879 m<sup>3</sup>. Estos vasos operaron desde el 1° de Octubre de 2001 hasta el 31 de agosto de 2002 (11 meses); recibieron 452.038 ton de basura y se calcula que seguirán produciendo gases y lixiviados hasta el año 2017 (Collazos, 2004).
- *Fase II*: Está conformada por 4 vasos; tiene una superficie en planta de 5,8 ha y una capacidad de 670.916 m<sup>3</sup>. Esta fase operó desde el 1° de Septiembre de 2002 hasta el 14 de Septiembre de 2004 (12,5 meses) recibiendo más de 890.000 ton de basura y se ha estimado que dicha fase seguirá produciendo gases y lixiviados hasta el año 2020 (Collazos, 2004).

- **Alternativas:** Consistieron básicamente en la prolongación de las Fases I y II, y el aumento de la cota del relleno sanitario, llegando a alcanzarse una altura promedio de coronamiento de 995 m.s.n.m. Estas alternativas se iniciaron a fines del año 2004, y se extendieron hasta fines de Julio de 2008, fecha en la cual la CVC (*Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca*)<sup>2</sup> ordena el cierre definitivo del relleno sanitario.

Actualmente, los lixiviados que se están produciendo en Navarro (a través del relleno transitorio) se almacenan en lagunas en las que se ha tenido en cuenta la protección de las aguas subterráneas mediante la combinación de una barrera geológica y un revestimiento artificial (CVC, 2004). Sin embargo, en algunas ocasiones se han originado derrames producto de la colmatación de las mismas debido al gran volumen de lixiviado generado a través del relleno sanitario.

## 2.2 Hidrometeorología

Para la caracterización hidrometeorológica del área de estudio se utilizaron los datos de la estación Meléndez, estación automatizada perteneciente al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (*CENICANÑA*). La misma se localiza en coordenadas: 1.062.389,32 Este y 863.989,50 Norte; presenta una elevación de 967 m.s.n.m, y se encuentra a una distancia de 2500 m hacia el oeste del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro. Esta estación posee registros continuos de temperatura mínima, media, máxima, humedad relativa, radiación, precipitación y evaporación, desde el año 1993.

A continuación se presenta una caracterización de las principales variables medidas en esa estación, para el período comprendido entre los años 1993 – 2010.

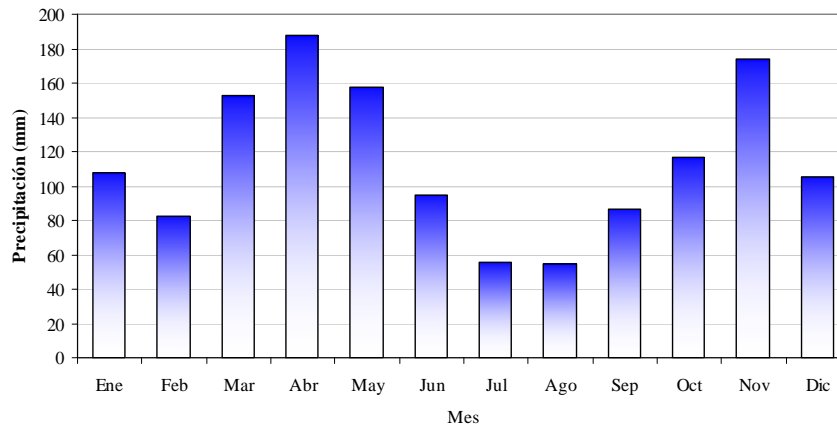
### 2.2.1 Precipitación media mensual

La precipitación media anual en el área es de, aproximadamente, 1377 mm/año. En la Figura 2.3, se observan las precipitaciones medias mensuales para los 18 años de registro. La serie analizada presenta una distribución bimodal, con dos períodos húmedos, característicos de la zona de estudio. El primero de ellos, el más intenso, ocurre durante los

---

<sup>2</sup> CVC: Organismo encargado de ejercer la autoridad ambiental y promover el desarrollo sostenible desde la dimensión ambiental, en armonía y coordinación con los distintos actores sociales del departamento del Valle del Cauca y áreas de influencia.

meses de marzo, abril y mayo, registrándose en el mes de abril una precipitación media de 188 mm. El segundo período húmedo se presenta durante los meses de septiembre, octubre y noviembre. En cuanto al período de menor precipitación, ocurre entre los meses de junio, julio y agosto. Los montos mínimos se dan en julio y agosto con una precipitación media mensual de 55 mm.



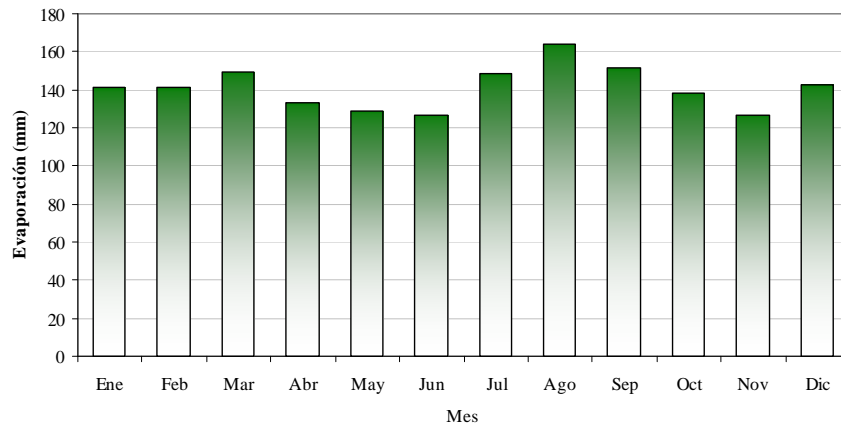
**Figura 2.3** Precipitación media mensual – Estación Meléndez – CENICAÑA  
Período 1993 – 2010

### 2.2.2 Evaporación media mensual

Con el propósito de mejorar la calidad del dato de evaporación suministrado por las estaciones meteorológicas del área, CENICAÑA adelantó investigaciones y mediante la aplicación de diferentes técnicas estadísticas (componentes principales, conglomerados, lógica difusa, regresión múltiple) y, especialmente, mediante la generación y el perfeccionamiento de una aproximación empírico-estadística, se obtuvo una ecuación que actualmente es la utilizada para el cálculo de la evaporación diaria. Esta ecuación incorpora los datos diarios de radiación solar, oscilación de la temperatura del aire, velocidad media del viento y humedad relativa del aire; y presenta una correspondencia alta con los valores medidos directamente en un tanque Clase A. A partir del 23 de diciembre de 2004 estos datos son publicados en el Boletín diario de la “Red de Monitoreo Automático” (RMA) de CENICAÑA.

Para la estimación de la evaporación en la zona de estudio se recopiló información de la Estación Meléndez (CENICAÑA) para el período 1993 – 2010. En el área de estudio la evaporación media anual es de unos 1692 mm/año, exhibiendo un valor medio mensual de 141 mm. El mes que presenta el mayor valor de evaporación es el de agosto, con un monto

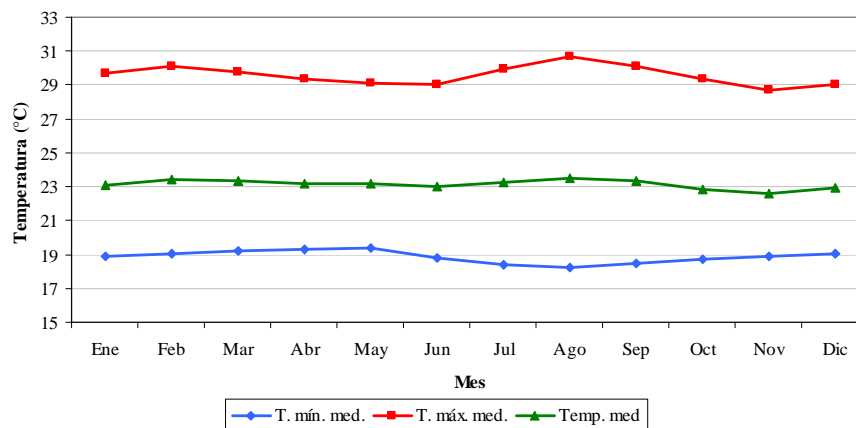
de 164 mm. En el mes de junio se da la menor tasa de evaporación mensual con un valor de alrededor de 126 mm (Figura 2.4).



**Figura 2.4 Evaporación media mensual – Estación Meléndez – CENICAÑA**  
Período 1993 – 2010

### 2.2.3 Temperatura

En la Figura 2.5, se puede observar el comportamiento de la temperatura en la zona de estudio. La temperatura mínima media mensual oscila alrededor de los 19°C, la temperatura máxima promedio es de unos 30°C, y la temperatura media mensual se encuentra alrededor de los 23 °C.



**Figura 2.5 Temperatura media multianual – Estación Meléndez CENICAÑA**  
Período 1993 – 2010

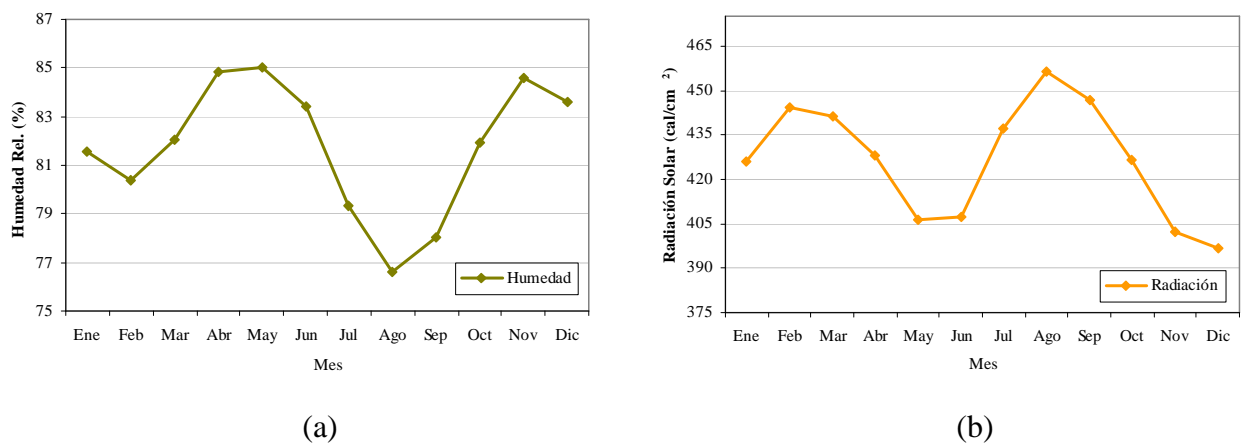
### 2.2.4 Humedad relativa y radiación solar

Al igual que la precipitación, la humedad relativa (HR) y la radiación solar se presentan bajo un régimen de tipo bimodal. En la Figura 2.6-a, se puede observar el comportamiento de la humedad relativa en la zona de estudio. Los valores máximos de HR se presentan en



los meses de abril – mayo – junio y noviembre – diciembre. Los meses de abril y mayo son los que presentan el mayor porcentaje de humedad alcanzando un 85%. El mes de agosto es el que presenta la menor HR con un valor de 77%.

La Figura 2.6-b muestra el comportamiento promedio mensual de la radiación solar en el área. El valor medio anual es de 427 cal/cm<sup>2</sup>; el mínimo mensual es de 397 cal/cm<sup>2</sup> y se presenta en el mes de mayo; mientras que la máxima tasa de radiación se da en el mes de agosto, donde alcanza un valor medio de 457 cal/cm<sup>2</sup>.



**Figura 2.6 (a) Humedad Relativa y (b) Radiación solar – Estación Meléndez CENICAÑA**  
Período 1993 – 2010

### 2.3 Hidrología superficial

El Antiguo Relleno Sanitario de Navarro se encuentra ubicado sobre la margen izquierda del río Cauca, aproximadamente, a 2700 m hacia el este de su cauce actual. El área está conformada por antiguos paleocauces, localmente conocidos como “Madreviejas”. Uno de los cauces antiguos más importantes, con presencia de un espejo de agua permanente, bordea el área del antiguo relleno. Hacia el sector sur y nor-oeste, el antiguo relleno está limitado por el Canal Interceptor Sur (Figura 2.7), comúnmente llamado Canal CVC, que fuera construido por la CVC para conducir el agua de lluvia del sector sur-este de la ciudad de Cali, algunas acequias y las corrientes de los ríos Cañaveralejo, Meléndez y Lili.

El río Cañaveralejo tributa al Canal Interceptor Sur, a una distancia de 6600 m aguas arriba del antiguo relleno de Navarro. También aportan a este curso algunos canales abiertos que conducen los excedentes pluviales de la ciudad de Cali. Esta cuenca se encuentra instrumentada desde 1974, por una estación limnigráfica ubicada a 997 m.s.n.m. El caudal

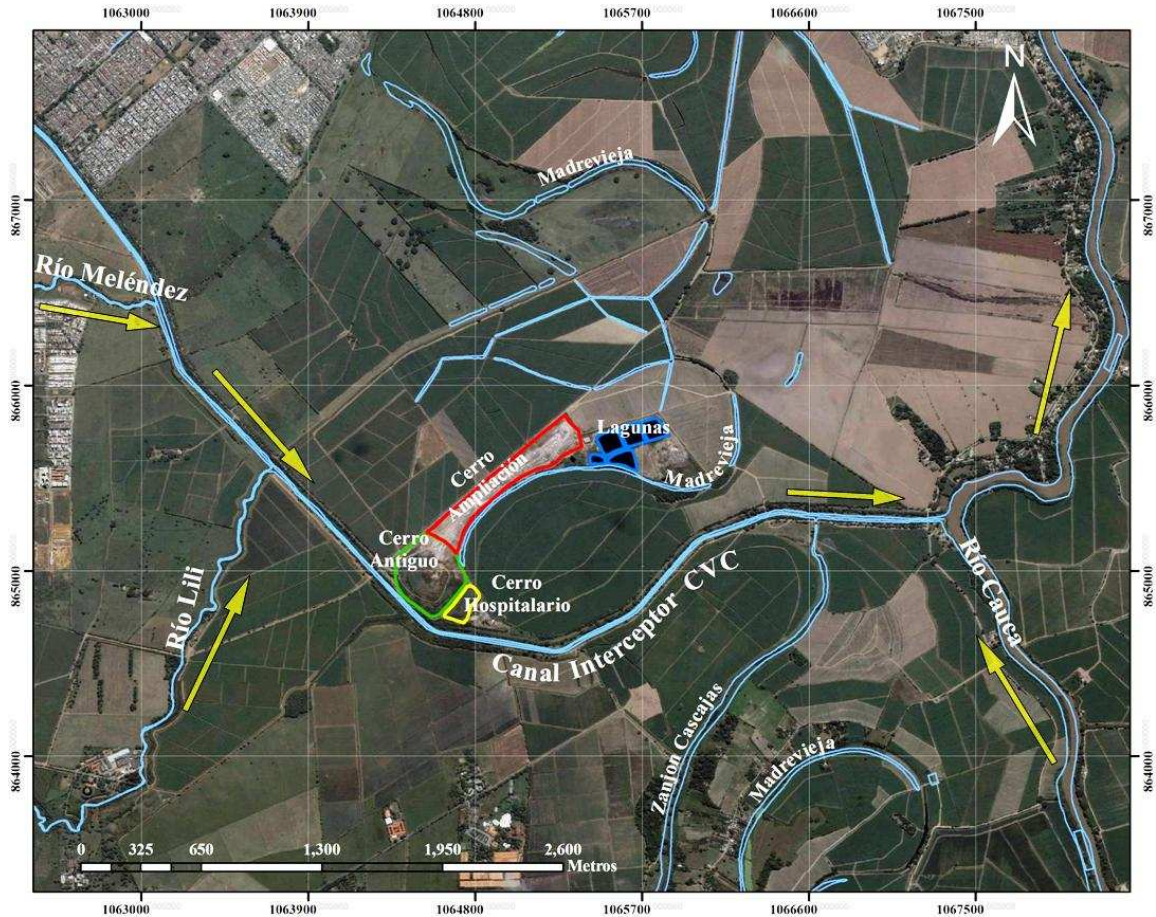
medio anual del río Cañaveralejo es de  $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un máximo en el mes de mayo de  $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$  y un mínimo entre los meses de agosto y septiembre de  $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$  (CVC, 2007a).

El aporte del río Meléndez al Canal Interceptor Sur se da a una distancia de 1960 m aguas arriba del antiguo relleno. La cuenca del río Meléndez se encuentra instrumentada en su tramo inferior desde el año 1982, con una estación limnigráfica ubicada a 1024 m.s.n.m. El caudal medio anual de este río es de  $1,59 \text{ m}^3/\text{s}$ . El régimen hidrométrico de caudales de esta corriente presenta una distribución bimodal, con dos períodos de caudales altos comprendidos entre los meses de abril – junio y octubre – diciembre. El mayor caudal que circula por su cauce se da en el mes de mayo con  $2,13 \text{ m}^3/\text{s}$ . El caudal mínimo es de  $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$  y se presenta en el mes de agosto (CVC, 2007b).

Otro curso de agua que tributa al Canal Interceptor Sur es el río Lili. El aporte se realiza a una distancia de 850 m aguas arriba del relleno antiguo. La cuenca del río Lili se encuentra instrumentada desde 1982. La primera estación limnigráfica (Estación Cañasgordas) fue arrastrada por el río en el año 1994. En su reemplazo, y a unos pocos metros aguas abajo de la anterior, se ubicó la estación limnigráfica Pasoancho, a una altura de 989 m.s.n.m (parte baja de la cuenca). De acuerdo a los registros de esta estación, el caudal medio anual de la corriente es de  $0,84 \text{ m}^3/\text{s}$ . El caudal máximo mensual se presenta en los meses de mayo y noviembre con  $1,11 \text{ m}^3/\text{s}$ . El menor caudal se da en el mes de agosto con  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$  (CVC, 2007c).

Como se mencionó anteriormente, el principal curso de agua que atraviesa el área de sur a norte es el río Cauca. Los caudales que circulan por este tramo del río son registrados aguas arriba y aguas abajo de la zona de estudio. La estación Hormiguero, ubicada aguas arriba, ha registrado un caudal medio anual de  $247 \text{ m}^3/\text{s}$ , un máximo de  $597 \text{ m}^3/\text{s}$  y un mínimo de  $94 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aguas abajo de la zona de estudio, los caudales son registrados por la estación Juanchito, en donde el río Cauca presenta un caudal medio de  $265 \text{ m}^3/\text{s}$ , un máximo de  $656 \text{ m}^3/\text{s}$  y un mínimo de  $113 \text{ m}^3/\text{s}$ , para un período comprendido entre 1965 y 2005 (Sandoval y Ramírez, 2007).

La Figura 2.7 muestra los diferentes cuerpos de agua superficial que coexisten en el área del antiguo relleno de Navarro.



**Figura 2.7** Localización de cuerpos de agua superficial en la zona de estudio

## 2.4 Marco Geológico Regional

El valle geográfico del Río Cauca está enmarcado por la cordillera Occidental y la cordillera Central; y se originó por una depresión interandina durante el Cretácico Inferior. Esta fosa tectónica fue rellenada por sedimentos cuaternarios de origen aluvial, aportados principalmente por el río Cauca y por los cursos tributarios de ambas cordilleras (INGEOMINAS, 2005). Geológicamente, el flanco occidental del bloque elevado de la cordillera Central está conformado por rocas ígneas efusivas y sedimentarias de los períodos Jurásico, Cretácico y Terciario, respectivamente (Barrero, 1979).

El bloque elevado de la cordillera Occidental está compuesto, principalmente, por rocas ígneas básicas, metasedimentarias y sedimentarias volcánicas marinas. En el borde oriental se desarrollaron, discordantemente sobre el basamento, rocas sedimentarias terciarias de origen continental e intrusiones ígneas del Terciario Superior fuertemente plegadas y falladas por el tectonismo que desencadenó una actividad intrusiva (Barrero, 1979).

De acuerdo a Barrero (1979) durante el Cretácico Superior se sucedieron esfuerzos compresivos, producto de movimientos de la placa oceánica sobre el continente, levantando la cordillera Occidental en un período orogénico, denominado Orogenia Calima. Sincrónicamente, a lo largo del borde oriental de la cordillera Occidental (Valle del Cauca) se emplazaron plutones básicos y ultrabásicos. La cordillera solevantada se comporta como área positiva, lo que permitió que en la antigua fosa tectónica, durante el Terciario Inferior, se depositaran sedimentos costeros y lagunares con presencia de yacimientos hulleros. Esta etapa fue seguida por la iniciación de un período de intenso vulcanismo de carácter andesítico, cuyos materiales constituyeron enormes extensiones de capas transportadas con características volcánicas sedimentarias.

Posteriormente, las estribaciones sometidas a los procesos estáticos (meteorización) y dinámicos (erosión), donde prevaleció el agua, transportaron y depositaron los sedimentos que rellenaron la fosa tectónica del Cauca. Estos procesos, acentuados por la deglaciación, permitieron la formación de un gran depósito de gravas, arenas y arcillas, que se seleccionaron a partir de la fuente de origen (tamaño, calibre, redondez, etc.) con características hidrogeológicas muy apropiadas para el almacenamiento de las aguas subterráneas (Sandoval y Ramírez, 2007).

## 2.5 Estratigrafía

Estudios llevados a cabo por INGEOMINAS<sup>3</sup> (2003, 2005), en la ciudad de Santiago de Cali, a través del Proyecto “*Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali*”, han corroborado la composición geológica del subsuelo del área de estudio.

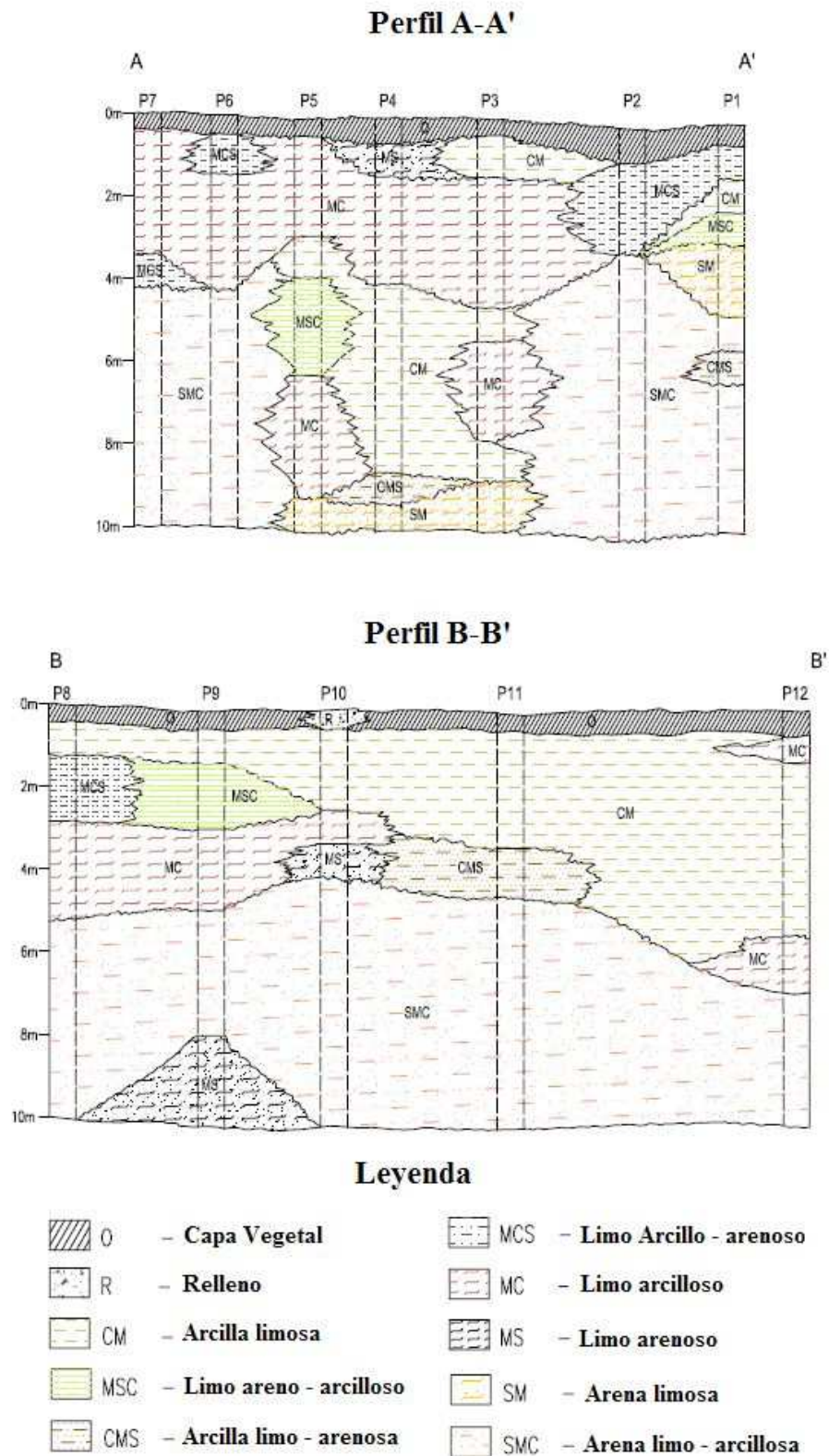
En las proximidades del relleno estas características geológicas fueron confirmadas a través de una serie de perfiles lito-estratigráficos en los cuales las perforaciones alcanzaron profundidades variables entre 10 y más de 100 metros (Figura 2.8 y Figura 2.9 respectivamente) .

En la Figura 2.8 se pueden apreciar las características texturales de dos de los perfiles más próximos al relleno, A-A’ y B-B’ (cuya ubicación espacial se muestra en la Figura 2.10).

---

<sup>3</sup> Instituto Colombiano de Geología y Minería





Nota: Nomenclatura a nivel descriptivo

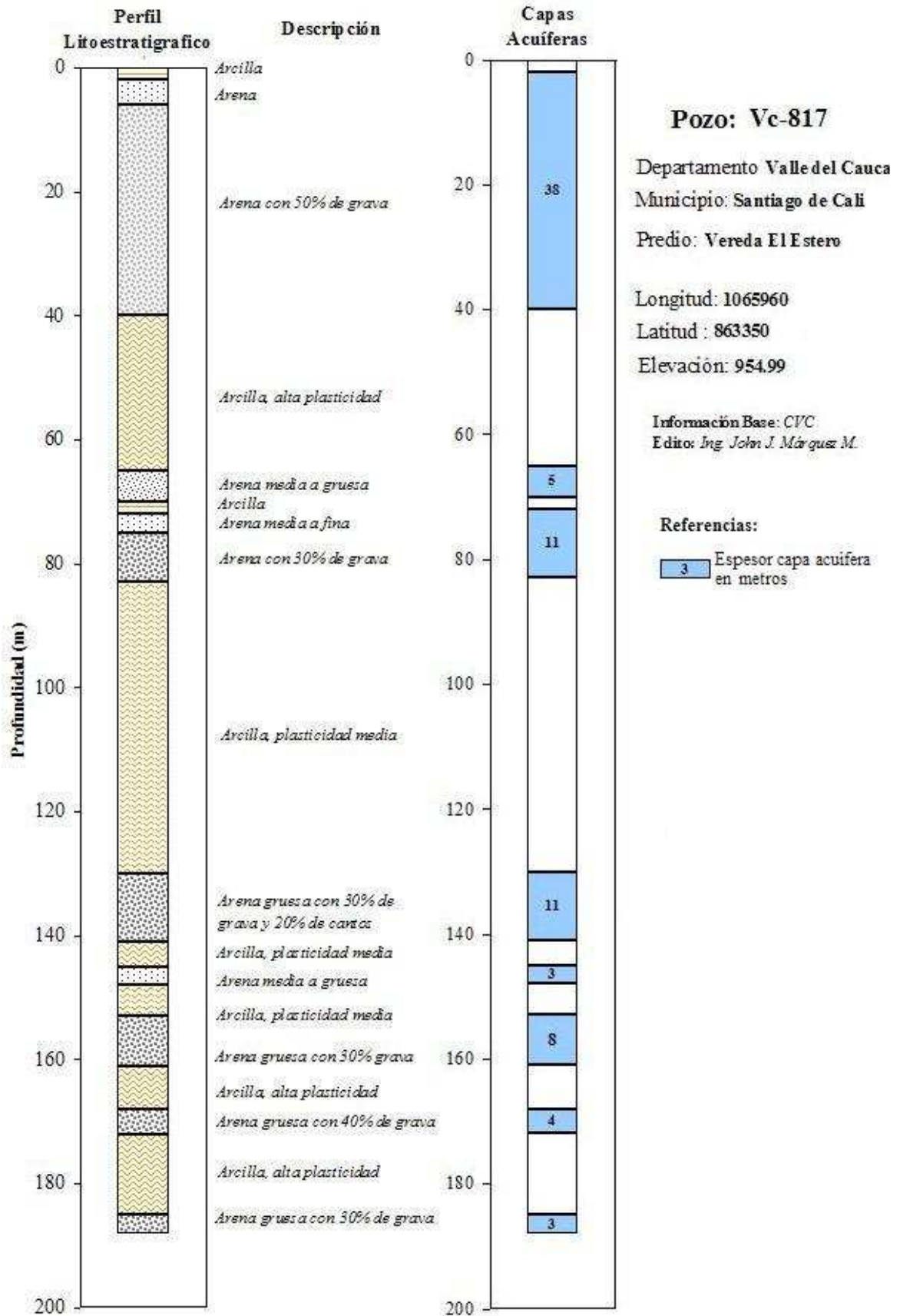
**Figura 2.8** Perfiles estratigráficos sector norte de Navarro  
 Fuente: INGEOMINAS (2003)

- *Perfil A-A'*: El perfil muestra hacia la base arenas limo arcillosas (SMC) a 4 m de profundidad en promedio suprayacidas por depósitos de sedimentos finos correspondientes a arcillas-limosas (CM), limos arcillo-arenosos (MCS), limos arenosos (MS) y limos arcillosos (MC), con predominio de estos últimos hacia la parte superior de la secuencia alcanzando, en promedio, espesores de 3 m (INGEOMINAS, 2003).
- *Perfil B-B'*: Al igual que el anterior, hacia la base de la secuencia se presentan depósitos areno-limo-arcillosos (SMC) a profundidades promedio de 4 m, cubiertos por depósitos limo-arcillosos (MC), limo-arcillo-arenosos (MCS), limo-areno-arcillosos (MSC), limo-arenosos (MS), arcillo-limo-arenosos (CMS) y arcillo-limosos (CM); éste último predominando sobre los otros y alcanzando su máximo espesor (5 m) hacia el extremo este. Estos depósitos finos están cubiertos por una capa vegetal de 0,5 m de espesor promedio (INGEOMINAS, 2003).

En el sector sur del relleno, la CVC cuenta con información litoestratigráfica proveniente de registros de perforaciones realizadas para pozos profundos de abastecimiento de agua y monitoreo. En particular se cuenta con un total de 52 perfiles, de los cuales el 65% tienen una profundidad promedio de 10 m, el 23% de 40 m y el 12% superan los 110 m de profundidad.

Entre las columnas de mayor profundidad se destacan las columnas de los pozos Vc-817 con 188 m de profundidad, Vc-105 con 107.5 m de profundidad, VC-681 con 156 m de profundidad y Vc-533 con 99 m de profundidad (Figura 2.10). La Figura 2.9 muestra la secuencia litoestratigráfica y espesor de cada una de las capas acuíferas identificadas en el pozo Vc-817. En ella se aprecia la existencia, en los primeros 2 m de profundidad, de una capa de material arcilloso seguida de una secuencia de material arenoso con porcentajes considerables de grava y algunos lentes arcillosos y de grava hasta una profundidad de alrededor de 80 m. Posteriormente la columna presenta una potente capa de material arcilloso, con un espesor de 47 m, la cual es seguida por una secuencia alternada de capas de mezclas de arenas con grava y lentes de arcilla.

El conocimiento de esta secuencia litoestratigráfica permite identificar la presencia de formaciones portadoras de agua, reconocer el tipo de acuífero y la continuidad e interconexión entre los mismos.



**Figura 2.9** Columna Litoestratigráfica pozo Vc-817  
 Elaboración propia



## 2.6 Geología Superficial Local y Geomorfología

Hermelin (1987) denomina Formación Superficial al conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros. Estas Formaciones Superficiales incluyen rocas con diferentes grados de meteorización, suelos y depósitos no consolidados.

Las unidades superficiales destacadas en la zona de estudio corresponden a formaciones aluviales recientes, compuestas por sedimentos actuales que han sido transportados y depositados por ríos y quebradas, conformando cauces activos y abandonados, llanuras de inundación y terrazas bajas y medias (INGEOMINAS, 2005).

El mapa geológico – geomorfológico para la zona de estudio (Figura 2.10) se elaboró tomando como base el mapa geológico preparado por Ignacio Cucalón para la CVC en el año 1969; el informe de los estudios geológicos y geomorfológicos realizados por INGEOMINAS (2005); el Estudio Hidrogeológico del río Cauca de Alvarez y Tenjo (1971), donde se describen la geoformas existentes en la zona de Navarro; la interpretación de las fotografías aéreas de los años 1957, 1984 y 1986, a través de las cuales se pudo identificar la evolución de los rasgos geomorfológicos superficiales producto de la intervención del hombre; y la descripción de los rasgos morfológicos del terreno definidos por Thornbury (1960).

En función de lo expuesto, la zona del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro está conformada por depósitos aluviales cuaternarios (Qal), corroborados mediante perforaciones que alcanzaron una profundidad de 480 m. Sin embargo, de acuerdo con algunos sondeos geofísicos, se estima que la profundidad de este relleno puede alcanzar los 600 a 700 m.

Los sedimentos que componen estos depósitos aluviales fueron aportados principalmente por el río Cauca y sus tributarios, como el río Pance, Meléndez y Lili. Estos depósitos presentan gran variedad en su composición y en su tamaño, encontrándose arcillas, limos, arenas medias y finas, además de gravas, mezcladas en diferentes proporciones o en ocasiones en estratos bien definidos.

La composición aproximada de los sedimentos imperantes en el área es: 50% arenas y gravas cuarzosas, 40% fragmentos de rocas (diabasas, rocas sedimentarias tipo areniscas, rocas ígneas ácidas, y rocas ultramáficas); magnetita, granate, epidota y zircón se encuentran como minerales accesorios en los sedimentos finos, cuya proporción alcanza un 10%.

La organización en el terreno de estos sedimentos dependió fundamentalmente de la dinámica de los ríos aportantes y de los ambientes de depositación, los que generaron meandros, zonas lagunares o pantanos, albardones semicirculares y otras geoformas sedimentarias, que actualmente son difíciles de identificar en el campo, debido a la construcción y mejoramiento de canales de drenaje, para la adecuación del uso de la tierra en cultivos de caña de azúcar, durante los últimos 20 años.

Las principales unidades geológicas – geomorfológicas de la zona de Navarro son:

### **2.6.1 Llanura Aluvial del Río Cauca (Qal 1)**

Se presenta como crestas bajas paralelas al cauce del río que pierden altura y pendiente a medida que se alejan de éste. Su mayor altura está junto al río y puede presentar anchos de más de 1500 m. Se origina por las pérdidas repentinas de la capacidad de transporte al desbordar las márgenes del río, lo cual obliga a la faja de meandros existentes a sobresalir por encima de la llanura aluvial baja. Estas geoformas predominan en la zona de Navarro y conforman el 20% del área que se muestra en la Figura 2.10.

En general, los depósitos son sueltos y están conformados por materiales heterogéneos que varían entre gravas, arenas, limos y arcillas, predominando la mezcla entre ellas. Sobre el terreno es muy difícil diferenciar la variación entre estos materiales, por ser la zona plana y no observarse afloramientos, ni evidencias de cambios geomorfológicos que permitan hacer una distinción clara.

Análisis de muestras de este tipo de depósito en el sector de Navarro describen su composición como una mezcla de arenas y gravas correspondientes en un 50 % a cuarzo (hialino y lechoso), un 40% a fragmentos líticos (neises y esquistos micáceos, basaltos, rocas ultramáficas, rocas ígneas ácidas y rocas sedimentarias del tipo areniscas). El 10% restante corresponde a minerales accesorios tales como micas (biotitas y muscovitas),

anfíboles, piroxenos, magnetita e ilmenita, granates, epidota y zircón, que se aprecian más comúnmente en las fracciones de arenas finas (INGEOMINAS, 2005).

### **2.6.2 Abanicos Aluviales (Qal 2)**

Compuestos por todos los materiales asociados a flujos torrenciales depositados por los principales afluentes del río Cauca al llegar a su planicie aluvial, debido a una pérdida repentina de la capacidad de arrastre de las corrientes, al encontrar una disminución en la pendiente.

La parte más distal de estas unidades está conformada por materiales finos y bien seleccionados, a diferencia de los ubicados hacia el ápice, donde su granulometría es mayor y se encuentran pobremente seleccionados.

Estos depósitos son medianamente compactos; se componen principalmente de cantos, gravas y bloques de rocas diabásicas con presencia esporádica de rocas sedimentarias, de formas angulares a sub-redondeadas, en matriz areno-arcillosa.

Los abanicos son de tipo coalescente, es decir, presentan contactos laterales interdigitados por su crecimiento conjunto, por lo cual se cartografiaron como una sola unidad con límites aproximados entre ellos, así como el contacto con la llanura aluvial del río Cauca. En la cartografía de estos depósitos se tuvieron en cuenta los cambios topográficos, análisis de fotografías aéreas antiguas y recientes, las características morfológicas del terreno y pequeños cambios en la dirección de los drenajes (INGEOMINAS, 2005). Los abanicos más importantes observados en la zona de estudio son el de Pance, Meléndez y Cañaveralejo, contabilizando un 20% del área total representada en la Figura 2.10.

### **2.6.3 Cauces o Meandros Abandonados (Qal 3)**

Corresponden a lechos de ríos y arroyos que por procesos naturales de dinámica y divagación del cauce o, en ocasiones, por acción del hombre -con el objeto de aprovechar la mayor extensión de la planicie aluvial para fines agropecuarios- son aislados o abandonados.

En algunos sectores estos cauces abandonados se encuentran cubiertos por agua y en otros, rellenos por materiales predominantemente arcillosos.

Se presentan principalmente en Navarro y a todo lo largo del antiguo cauce del río Cauca, conocido por sectores como Caño El Estero, Cascajal y Cauquita, ubicados entre La Playa El Hormiguero y Puerto Mallarino (INGEOMINAS, 2005).

#### **2.6.4 Depósitos de Pantanos Aluviales (Qal 4)**

Son depósitos sedimentarios acumulados en las zonas inundables, que sobrepasan los albardones naturales, con alturas menores a 1,50 m y con deficientes líneas de drenaje, rellenas y borradas por inundaciones sucesivas.

Corresponden a depósitos principalmente arcillo-limosos, caracterizados por presentar un relieve suave y deprimido. Sobre esta unidad se localiza parte de Navarro y algunos sectores de Aguablanca (INGEOMINAS, 2005). Dentro de la zona de estudio ocupan aproximadamente el 7% del área total.

#### **2.6.5 Zonas Desecadas y Rellenos de Cauce (Qal 5)**

Corresponde a zonas de antiguos pantanos, conformados por sedimentos finos, drenados artificial o naturalmente. Generalmente se encuentran dentro de la llanura aluvial o alrededor de las zonas de pantanos (Qal4). Este tipo de unidad es la de mayor importancia en el área de estudio ocupando el 40% de la zona representada en la Figura 2.10.

#### **2.6.6 Depósitos Aluviales Activos y Terrazas (Qal 6)**

Son los depósitos aluviales recientes y actuales, sueltos, acumulados en las llanuras y márgenes de los ríos y arroyos, encontrados a manera de barras, playas y terrazas, con granulometría variable (arena, grava, cantos y bloques). Su composición corresponde a rocas ígneas (diabasas, dioritas, anfibolitas) y sedimentarias (areniscas, conglomerados y chert) provenientes de la cordillera occidental.

### **2.6.7 Barras Puntuales o Point Bars o Albardones semilunares (Qal 7)**

Se refieren a los bancos de arena que se desarrollan en el lado interno de la curva de un meandro y crecen por la adición lenta de sedimentos. Se desarrollan a medida que se presenta la migración del meandro. Estos materiales se encuentran fundamentalmente asociados al antiguo cauce del río Cauca, que alcanzó a desarrollar grandes meandros. El basurero de Navarro se localiza sobre esta unidad (INGEOMINAS, 2005). Dentro de la zona de estudio este tipo de depósito ocupa aproximadamente un 2%.

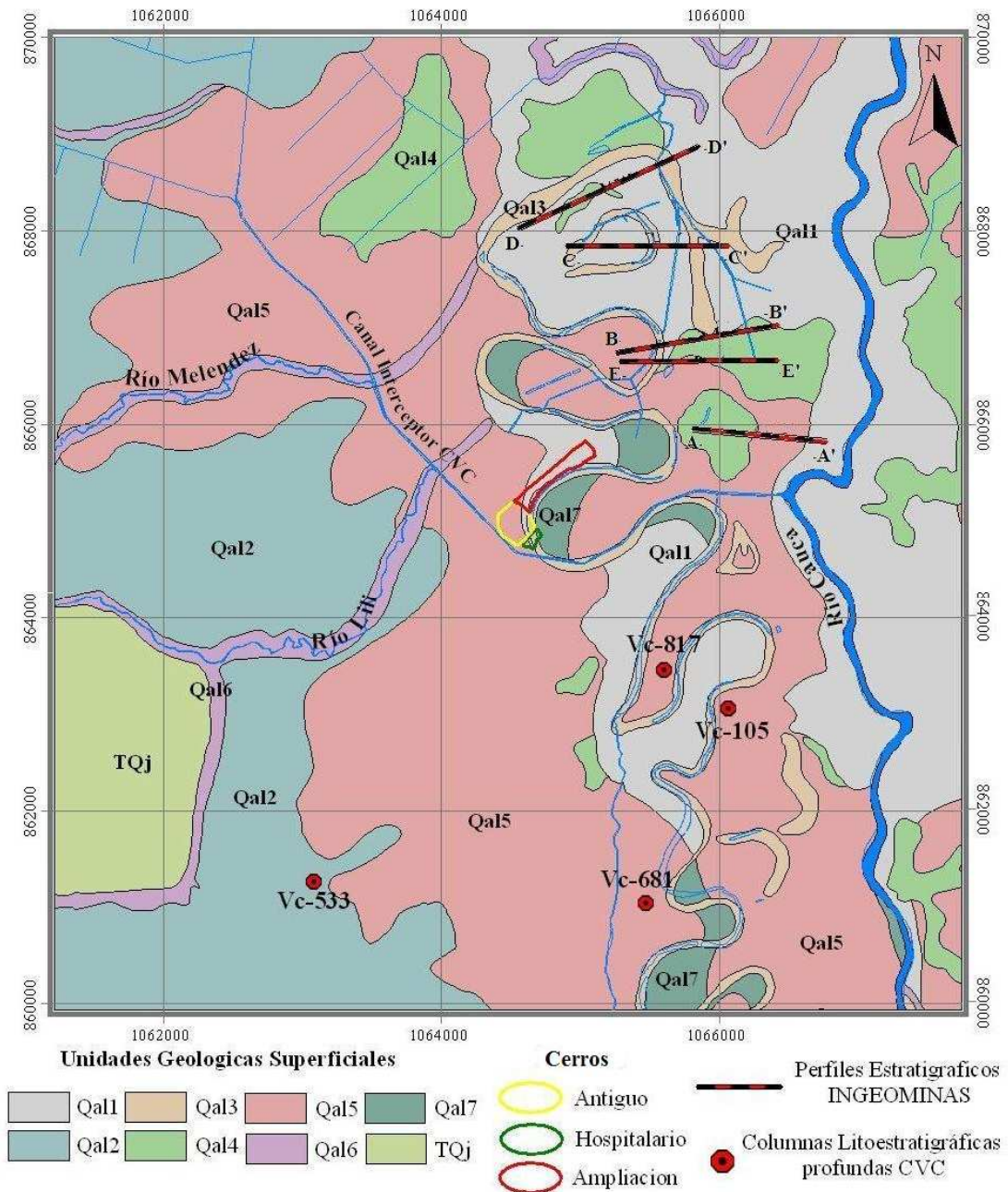
### **2.6.8 Formación Jamundi (TQj)**

Conformada por depósitos no consolidados denominados inicialmente por Keiser (1954) como “Abanico de Jamundí”. Fue definida formalmente como Formación Jamundi por Verdugo y Nivia (1985) para referirse a depósitos de abanicos aluviales no consolidados que afloran al suroccidente de Cali, y que suprayacen discordantemente al Grupo Cauca (conjunto de formaciones del terciario). Generalmente se encuentra dispuesta en niveles horizontales, aunque se observan algunos sectores donde éstos buzcan al este, tal como ocurre al occidente del barrio Meléndez, donde los estratos presentan un rumbo N22°E y buzcan 57°SE.

El origen de estos depósitos ha sido explicado por Keiser (1954) a partir de los cambios ocurridos durante ciertos períodos en el Pleistoceno, cuando las partes altas de la Cordillera Occidental estaban cubiertas por hielo y nieve. Con el deshielo se liberaron inmensas masas de agua cuya acción erosiva ensanchó y ahondó los cauces de los cursos superficiales, principalmente en las regiones altas de la cordillera. Las aguas de fusión transportaron los bloques y cantos de manera errática, con una masa arenácea más fina en suspensión, mezclada con cantidades de arcilla roja laterítica hacia la planicie de la cuenca geológica del Cauca, depositándose como abanicos fluviotorrenciales.

Según Nivia (2001), esta formación consiste en depósitos de gravas y cantos no consolidados, pobremente seleccionados, compuesta por materiales de derivación local como basaltos, cher (*silexita*), gabros, limolitas, conglomerados y areniscas de tamaño muy variable (desde pocos centímetros hasta 3 metros). La matriz que envuelve estos clastos es de tipo predominantemente arcillosa y de color rojizo. Hacia la parte superior de la formación se presentan horizontes arcillosos y arenosos bien estratificados. Se aprecian

además niveles de arcillas grises, muy compactas, pero frágiles y con tendencia a la partición, tal como ocurre hacia los sectores conocidos como Polvorines y Altos de Ciudad Jardín. En este último sector mencionado se encuentran taludes de hasta 10 metros de altura. No se ha definido su edad y según Nivia (2001), es improbable que la unidad exceda los 50 metros de espesor. En la zona de estudio esta unidad se localiza hacia el sector sur-oeste de la zona de estudio (Figura 2.10).



**Figura 2.10 Principales Unidades Geológicas Superficiales**

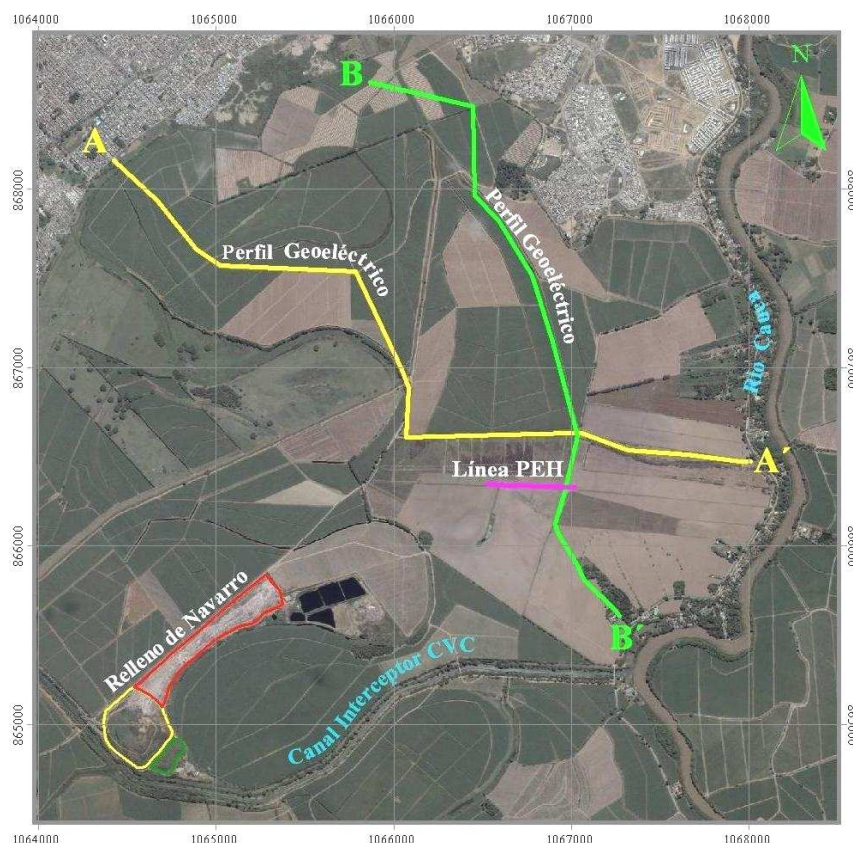


## 2.7 Geofísica

En la zona de estudio se han llevado a cabo diferentes estudios de investigación geofísica, la mayoría de los cuales fueron encarados por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). Específicamente en el sector de Navarro los estudios geofísicos comprendieron métodos potenciales (gravimetría y magnetometría), métodos resistivos (sondeos eléctricos verticales, tomografías y electromagnetismo), sísmica de reflexión y sísmica de refracción. Las mediciones realizadas en campo fueron procesadas e interpretadas convenientemente (INGEOMINAS, 2003).

A continuación se presentan algunos de los aspectos fundamentales y los resultados más relevantes alcanzados en los estudios de resistividad eléctrica mencionados.

El objeto de utilizar el **método de resistividad eléctrica** en el área de Navarro fue elaborar modelos bidimensionales básicos para la caracterización geotécnica del sector. Con este método se determinaron las características, espesores y contrastes litológicos de los materiales presentes en el subsuelo, haciéndose Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Sondeos Electromagnéticos (SEM) y un perfilaje eléctrico (PEH) en una línea de 450 m (Figura 2.11).

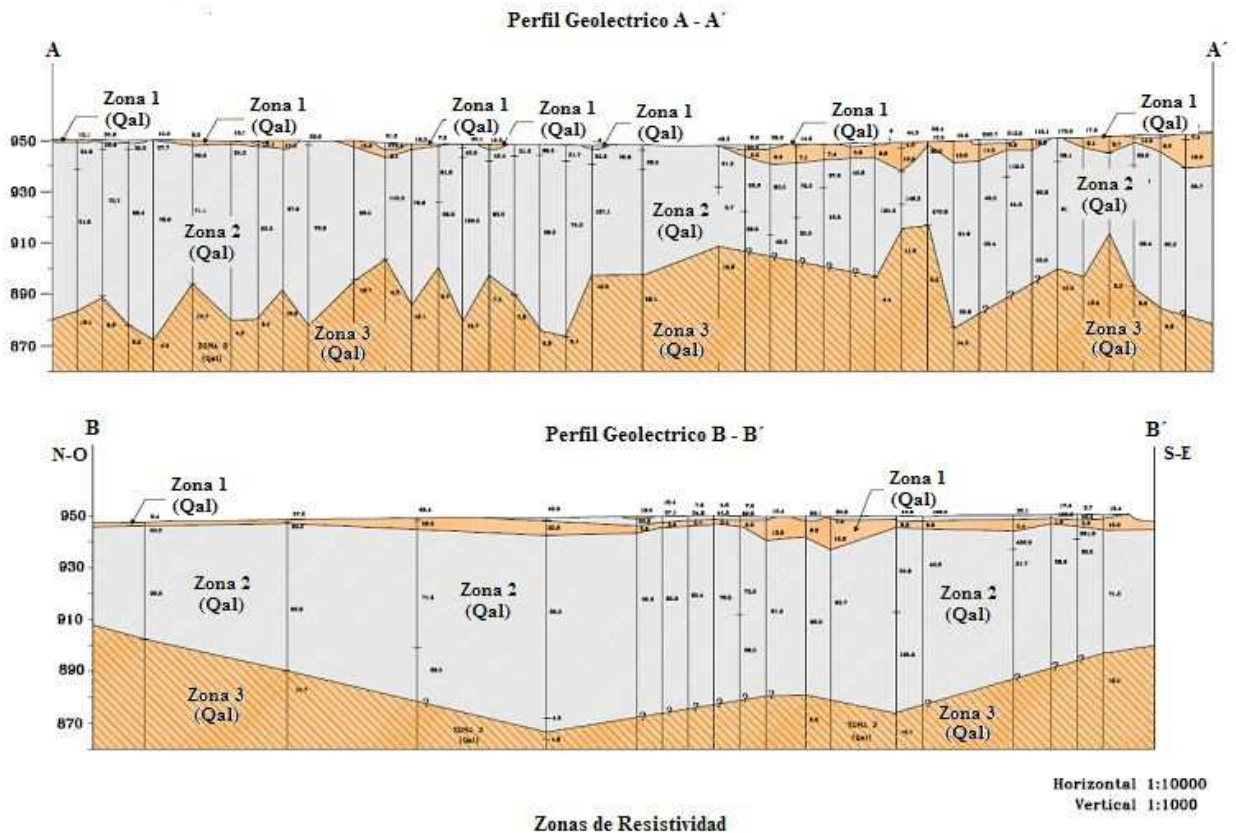


**Figura 2.11** Vista en planta de los perfiles geoelectricos y línea PEH



De acuerdo a los resultados obtenidos cualitativamente es posible considerar diferentes zonas resistivas (Figura 2.12):

- Zona de resistividad 1:** Es la zona de resistividad más superficial. Su presencia es predominante hacia los sectores NW y SE del área de estudio. Se hace presente en los dos perfiles geoelectricos y se caracteriza por tener valores bajos de resistividad entre 1,8 y 19,3 Ohm-m, con espesores que varían entre 0,3 y 15 m. Litológicamente está constituida por arcillas blandas plásticas (rango de resistividad más bajo), y arcillas limo-arenosas (para el rango de resistividad más alto).



Zonas de Resistividad				
ZONA	Rango (Ohm-m.)	ESPESOR (m)	UNIDAD GEOLOGICA	CARACTERISTICAS LITOLOGICAS
1	1.8 - 19.3	0.3 - 15.0	Depósitos Aluviales (Qal)	Arcilla blanda plástica, Arcilla limosa plástica y arcilla arenosa.
2	21.2 - 456.9	28 - 83	Depósitos Aluviales (Qal)	Gravas, arenas de diferente tamaño de grano saturadas con agua. Eventuales intercalaciones arcillosas. Zona Acuifera.
3	2.0 - 19.9	no determinado	Depósitos Aluviales (Qal)	Arcilla, arena arcillosa, limos de baja plásticidad. Ocasionales niveles de arenas y gravas.

**Figura 2.12** Perfiles Geoelectricos en el sector de Navarro  
 Fuente: INGEOMINAS (2003)

- **Zona de resistividad 2:** Como puede observarse en el Perfil A – A', esta zona alcanza la superficie del terreno en la parte media del sector investigado, la que está formada por una franja de antiguos paleocauces del río Cauca en sentido noreste. Los valores de resistividad registrados varían entre 21,2 y 456,9 Ohm-m, con espesores entre 28 y 83 m. Litológicamente está compuesta por depósitos no consolidados de arenas limosas (para las resistividades más bajas del rango), y por gravas y arenas de diferente granulometría (para los valores de resistividad más altos).

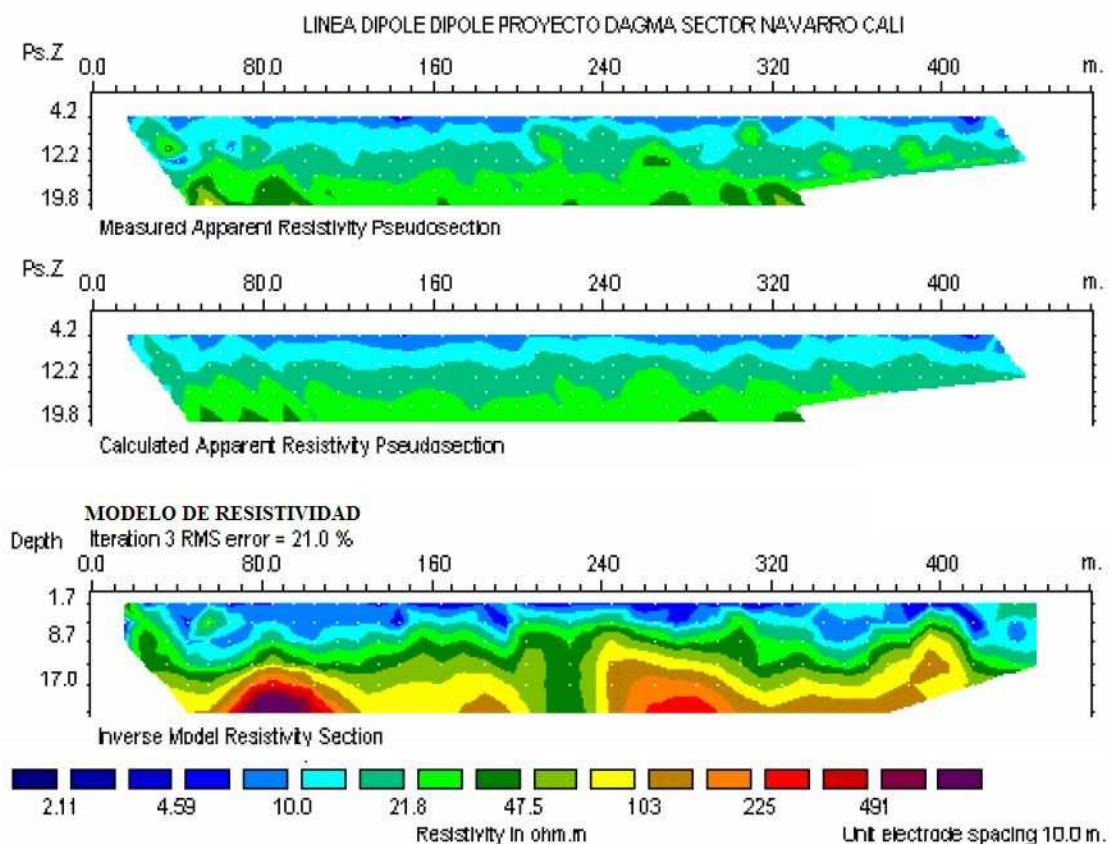
Esta zona, se comporta hidráulicamente como un acuífero libre, tendiendo a semiconfinado, y es denominada, en el Valle del Cauca, como Unidad Acuífera A. Además, en esta zona se presentan niveles limo-arcillosos lenticulares de poco espesor no registrados con geoelectrónica, pero reportados en las descripciones litológicas de los pozos para aguas subterráneas y perforaciones realizadas en el área.

- **Zona de resistividad 3:** Zona con resistividades entre 2 y 19,9 Ohm-m y espesores no determinados. Litológicamente es correlacionable con una monótona secuencia de arcillas medianamente plásticas con los valores más bajos de resistividad, y de arcillas limo-arenosas para los más altos. Dentro de esta unidad geoelectrónica ocurren niveles lenticulares de gravas y arenas no detectables, pero reportadas en las descripciones litológicas de los pozos para aguas subterráneas y perforaciones realizadas por el proyecto.

Geológicamente las tres zonas de resistividad descritas anteriormente son correlacionables con Depósitos Aluviales (Qal) no consolidados de origen fluvio-lacustre del Valle del río Cauca.

A su vez, y con el propósito de conocer en detalle la relación superficial arcilla-arena, se midió una línea de **PEH con arreglo dipolo-dipolo**, con un azimut de 185° y ubicada al sur del sector de Navarro, en la Finca Milán (Figura 2.13). En la línea se observa una escala de colores (Figura 2.13) con una gama de tonalidades de colores azules oscuros hasta rojos violáceos. Los colores azules, con resistividades entre 2 y 20 Ohm-m, indican materiales de composición arcillosa a arcillo-limosa; las tonalidades verdosas, amarillentas y rojizas, con resistividades entre 20 y 491 Ohm-m se correlacionan con arenas limosas, arenas y gravas saturadas, constituyendo la parte más superficial de los depósitos, hasta

aproximadamente 20 m de profundidad. En estos sedimentos se encuentra alojada la denominada Unidad Acuífera A.



**Figura 2.13** Línea PEH con arreglo dipolo-dipolo en el Sector de Navarro.  
*Fuente: INGEOMINAS (2003)*

## 2.8 Marco Hidrogeológico Regional

En el Departamento del Valle del Cauca el agua subterránea es un recurso de vital importancia para el desarrollo económico de la región. Es aprovechada, principalmente, por los sectores agrícola, industrial y de servicios públicos.

A fines de 1967, la Corporación Autónoma Regional del Valle Cauca (CVC) inició los estudios hidrogeológicos en el alto valle del río Cauca, con el fin de evaluar el potencial de las aguas subterráneas, en términos de calidad y cantidad, y poder así disponer de la información técnica necesaria para planificar su aprovechamiento (CVC - REGLA-AS, 2009).

Las investigaciones se realizaron en dos zonas, las que se denominaron zonas sur y norte. El área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro se ubica en la zona sur, cuya superficie

abarca 4600 km<sup>2</sup>, de los cuales 3000 km<sup>2</sup> corresponden a tierras planas y 1600 km<sup>2</sup> a las estribaciones de las cordilleras Central y Occidental. Este estudio permitió llevar a cabo una evaluación cuantitativa y cualitativa del recurso hídrico subterráneo dentro de la jurisdicción de la CVC, principalmente en la parte plana del valle y estructurar un plan de manejo técnico del agua subterránea.

Como resultado de estos estudios hidrogeológicos regionales, en ambas zonas se identificó un depósito aluvial que se denominó **Acuífero del Cauca**. El mismo presenta dos niveles acuíferos que se conocen como Unidades A y C, y un nivel hidráulicamente acuicludo denominado Unidad B. Estos niveles se encuentran claramente localizados y poseen características bien definidas.

- **Unidad A (acuífero):** También definida como *Nivel Superior* del Sistema Acuífero del Cuaternario en función de los estudios de hidrogeología isotópica e hidrogeoquímica realizados recientemente (CVC-REGLA-AS, 2009). En la zona se la encuentra entre 50 y 60 m. En algunas zonas próximas al río Cauca, su espesor promedio es de 120 m con un 35 a 40% de capas acuíferas (45 m en promedio). Los acuíferos de esta unidad son, principalmente, libres y semiconfinados con rendimientos específicos entre 1 y 10 l/s/m (CVC-REGLA-AS, 2009). Litológicamente esta unidad está constituida por una secuencia alterna de capas permeables e impermeables de diferente espesor y granulometría. En la llanura aluvial y partes bajas de los conos aluviales, los sedimentos permeables se corresponden a gravas y arenas con guijarros muy finos. En las partes medias y altas de los conos aluviales, existen cantos rodados y bloques. Las arenas del relleno aluvial, en general, se encuentran en todos los tamaños; pero en aquellas áreas de antiguos pantanos con poca dinámica (en relación al arrastre de sedimentos) prevalecen las arenas finas y muy finas.
- **Unidad B (acuicludo):** También conocida como *Nivel Intermedio*. Se encuentra entre los 120 y 200 m de profundidad. Los sedimentos que la componen son típicamente arcillosos, pero es común encontrar limos y lentes de arenas y gravas finas de poco interés hidrogeológico. Con frecuencia se encuentran horizontes de materia orgánica en descomposición. Su espesor promedio es de 60 m, si bien en algunos sitios alcanza más de 80 m. Actúa como techo confinante para los acuíferos del nivel inferior. Aunque no posee interés desde el punto de vista del

aprovechamiento del agua subterránea, sí reviste una gran importancia para la protección contra la contaminación de los acuíferos confinados del nivel inferior (CVC- REGLA-AS, 2009).

- **Unidad C (acuífero):** También definida como *Nivel Inferior* del Acuífero del Cauca. La geometría de esta unidad aún no está bien establecida. Su ocurrencia se ha identificado a través de cinco exploraciones profundas, realizadas en la ciudad de Cali, de 400 m de profundidad. En ellas se han encontrado espesores del nivel inferior del orden de los 250 m, con un porcentaje de materiales permeables de alrededor del 30%. Perforaciones más profundas, realizadas para exploración de gas, muestran que en el centro del valle, en el municipio de Palmira, existe un relleno aluvial con un espesor superior a los 1000 m. No obstante, la información disponible no permite definir la profundidad del nivel inferior del relleno aluvial, pues, en estas perforaciones, no se ha logrado identificar el contacto entre el terciario y el cuaternario (CVC-REGLA-AS, 2009).

## 2.9 Calidad de las aguas subterráneas

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca ha conformado un registro con el resultado de los análisis físico-químicos de más de 500 muestras de agua provenientes de perforaciones que aprovechan el sistema acuífero ubicado entre los 35 m y 150 m de profundidad. El período de registro abarca desde 1997 a la actualidad. Para facilitar su interpretación se ha adoptado una representación gráfica, a través de mapas, teniendo en cuenta los parámetros que, de acuerdo a la experiencia de la CVC en el área, más inciden en la calidad del agua subterránea para diferentes usos. Estos valores han servido como indicadores para conocer su procedencia e interrelaciones con el medio por donde circulan.

En base al enfoque enunciado, la CVC ha elaborado, a nivel regional, mapas de conductividad eléctrica, dureza total, hierro + manganeso y dióxido de carbono (CVC-REGLA-AS, 2009). Cabe aclarar que los rangos seleccionados para graficar los diferentes parámetros no se encuentran enmarcados en norma internacional alguna de calidad de agua y solo están referidas a las características del agua subterránea en la zona y sus diversos usos.

A continuación se presentan, de manera general, algunos de los parámetros determinados por CVC en las cercanías del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro, tomando como referencia los informes y los mapas de calidad de agua realizados por este organismo:

- **Conductividad Eléctrica:** En el área de interés, el agua subterránea presenta valores de conductividad eléctrica que se encuentran entre 300 y 500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . En general, la calidad del agua subterránea del depósito aluvial en la zona es apta para el riego de todo tipo de cultivos. De acuerdo a las Normas de Riverside (U.S. Soil Salinity Laboratory) se clasifica como C2-S1 (Agua de salinidad media y peligro de sodificación bajo) (CVC-REGLA-AS, 2009).
- El agua subterránea en la zona presenta valores de **dureza** con un rango de entre 0 a 100 mg/l  $\text{CaCO}_3$ , lo que implica que se pueden clasificar como aguas blandas.
- El **hierro** (Fe) y el **manganeso** (Mn) presentan concentraciones elevadas. Los valores hacia el sector oeste oscilan entre 0,3 a 1 mg/l. En el sector nor-este, el rango de concentraciones se encuentra entre 1 y 5 mg/l. Estos tenores le dan el calificativo de aguas con altos a muy altos contenidos de hierro y manganeso y les confieren un uso restringido para determinadas actividades.
- Las concentraciones de **CO<sub>2</sub>** en el agua subterránea son aceptables, con valores que oscilan de 10 a 40 mg/l. El ataque que pueden sufrir las tuberías y filtros es bajo o moderado, permitiendo a los pozos profundos una vida útil de unos 15 a 20 años en gran parte de la zona plana.

En general, y de acuerdo a los parámetros determinados y escalas de concentración establecidas por la CVC, el agua subterránea del área de estudio es de buena calidad; a excepción del sector nor-este donde se presentan los elevados contenidos de Fe y Mn. La misma se puede clasificar como bicarbonatada cálcico-magnésica, lo que, en primera instancia, estaría reflejando la recarga reciente del agua a la Unidad *Acuífera A*.

## Capítulo 3: Procesamiento y análisis de la información

### 3.1 Información cartográfica e implementación de un SIG

La representación cartográfica de las características hidrogeológicas de un determinado territorio cumple, entre otros, con los siguientes fines (Ribera *et al.*, 2009):

- Representar todas aquellas características o fenómenos relacionados con las aguas subterráneas y su interacción con el terreno, en sus múltiples aspectos: cantidad, calidad, procesos geodinámicos, etc., referidos a un determinado período de observación (que puede ser una situación instantánea o momentánea de los aspectos mencionados, una ocurrencia extrema o una situación media).
- Publicar y actualizar de forma periódica la situación de los sistemas hídricos subterráneos;
- Mejorar la utilización, planificación y gestión de los recursos hídricos atendiendo los aspectos técnicos, legales, administrativos y económicos;
- Reducir los costos de la gestión de los recursos hídricos;
- Ser una herramienta para la definición de políticas de protección de los recursos hídricos, para la información pública y la educación.

Por lo tanto, un mapa que represente las características hidrogeológicas de un área tiene como función principal la de constituir una herramienta para visualizar y comprender sus condiciones (regionales o locales) observadas o deducidas, a partir de las investigaciones correspondientes, en un momento dado. Esto requiere la recopilación de una gran cantidad de información de datos muy dispersos y de distinto tipo, cuya interpretación y combinación debe realizarse de manera rigurosa.

Por otra parte, de acuerdo a Struckmeier y Margat (1995) dentro de la familia de las Ciencias de la Tierra, la Hidrogeología es el nexo entre las Geociencias y las Ciencias Hídricas. Por lo tanto, un mapa hidrogeológico debe reflejar ese carácter transicional, ya que abarca una gran cantidad de variables y magnitudes, relacionados con ambas ciencias.



En general, los componentes básicos para presentar la información hidrogeológica en forma de mapa son (Ribera *et al.*, 2009):

- a. Una base topográfica adecuada, simplificada de ser necesario, de modo de facilitar la orientación y la ubicación de cada punto sobre la superficie y de representar los datos hidrológicos más relevantes (red de drenaje, cuerpos de aguas, etc.)
- b. Una base geológica adaptada, en donde se debe garantizar la correcta transferencia de la información litoestratigráfica (propia de un mapa geológico) a las unidades hidrogeológicas correspondientes.
- c. Una base de datos confiables, relacionada con el producto cartográfico que se procura realizar y origen de cualquier actualización posterior.
- d. Y por sobre todo, una correcta interpretación y validación de los datos. El hecho de disponer de gran cantidad de información en una determinada zona no garantiza el éxito de la tarea. El principal condicionante para completar un proyecto de este tipo es la representatividad y precisión de los datos disponibles, lo que implica un análisis crítico y metódico de cada uno de ellos.

En este caso de estudio particular, el área presenta valiosa información antecedente. Dada la procedencia de la misma y debido a que la presentación gráfica de los resultados, en ciertas ocasiones, suele resultar más comprensible, gran parte de ella se encuentra exhibida en forma de mapas. Es así como *curvas de nivel, cuerpos de agua, geología, inventario de puntos de agua, localización de sondeos geofísicos, etc.*, están asociados a una representación a escala, sobre una superficie bidimensional, conjuntamente con una serie de características o accidentes naturales o artificiales.

Además, debido a las características y el uso compartido de la información entre los diferentes actores implicados, se consideró beneficioso estructurar la misma en una herramienta transversal y abierta que integre las diferentes escalas espacio – temporales de los datos. Es así como la información disponible, procesada y analizada, se incorporó a un Sistema de Información Geográfico, desarrollado a través de la herramienta ArcGIS® (ESRI, 2007). Este sistema contribuyó a integrar, almacenar, editar y mostrar, de manera organizada la información antecedente y procesada, geográficamente referenciada, y al reconocimiento de las particularidades y generalidades más destacables del área bajo análisis.

### 3.1.1 Sistema de referencia geográfico

La base cartográfica fue proporcionada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y corresponde a las hojas 300IC1, 300IC2, 300IC3 y 300IC4, a escala 1:10000, en formato digital (\*.DWG). También se contó con una serie de información adicional, en escala 1:25000, en formato (\*.SHP). La información cartográfica proporcionada provenía de diferentes estudios con distintos objetivos y tiempos de realización, por lo que no presentaban el mismo sistema de referencia geográfico. Es por ello que fue necesario realizar una validación de la cartografía recopilada y definir, para el desarrollo del SIG, las siguientes referencias geográficas:

*Projected Coordinate System:* Colombia\_East\_Zone  
*Projection:* Transverse\_Mercator  
*False\_Easting:* 1000000.00  
*False\_Northing:* 1000000.00  
*Central\_Meridian:* -68.08091667  
*Scale\_Factor:* 1.00000000  
*Latitude\_Of\_Origin:* 4.59904722  
*Linear Unit:* Meter

*Geographic Coordinate System:* GCS\_Bogota  
*Datum:* D\_Bogota  
*Prime Meridian:* Greenwich  
*Angular Unit:* Degree

### 3.1.2 Sistema de referencia topográfico

Al analizar la cartografía se detectó, además, que la información recopilada presentaba dos sistemas de referencia topográficos. El primero de ellos establecido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y denominado Marco Geocéntrico Nacional de referencia o Red MAGNA de estaciones GPS de primer orden (con una precisión de 1 mm en coordenadas y 4 mm por Km en nivelado en alturas). Este sistema fue implementado por la CVC para el registro de niveles de cuerpos de agua superficiales. El segundo es un sistema arbitrario establecido antiguamente por la propia CVC durante la planificación de las obras del embalse de Salvajina. Este sistema (conocido como Sistema CVC) se adoptó como referencia en el departamento del Valle del Cauca y ha sido utilizado para referenciar las cotas del terreno y niveles de agua en los pozos profundos (CVC-PMC, 2005).

Debido a la importancia que representa para el desarrollo del presente estudio, contar con un único sistema de referencia topográfico que permita definir adecuadamente niveles de superficie del terreno, de unidades hidrogeológicas, de cuerpos de aguas superficiales y

equipotenciales del sistema acuífero, se realizó la corrección de las cotas correspondientes. El sistema adoptado fue el IGAC y para la unificación del sistema de referencia se utilizó el punto GPS-11 de la red geodésica de alta precisión implementada por el *Proyecto de Modelación del Río Cauca* (PMC). Este punto del sistema IGAC tiene una cota topográfica de 954,881 m.s.n.m. y está localizado a 100 m de la desembocadura del Canal Interceptor CVC en el río Cauca (CVC-PMC, 2005). Una vez identificado el punto GPS se estableció su diferencia respecto al sistema CVC. Para el área de estudio la misma es de 5,02 m. La expresión empleada para llevar los valores correspondientes a un mismo plano de referencia es la expresión (3-1):

$$Cota\ IGAC = Cota\ CVC + 5.02\ m \quad (3-1)$$

El esquema del proceso de corrección topográfica utilizado se puede apreciar en la Figura 3.1. Dicha corrección se aplicó a las curvas de nivel de la superficie del terreno en el sistema CVC, Figura 3.1(a). Para ello se generó un modelo digital de elevaciones (DEM), Figura 3.1(b), el cual constituyó la base para el cálculo de las cotas del terreno. Con la topografía unificada en el sistema IGAC se recalcularon los niveles de agua superficial y subterránea en los puntos de muestreo y/u observación del área de estudio (ver *Anexo 1. Diferencias de cotas de terreno de puntos de agua*).

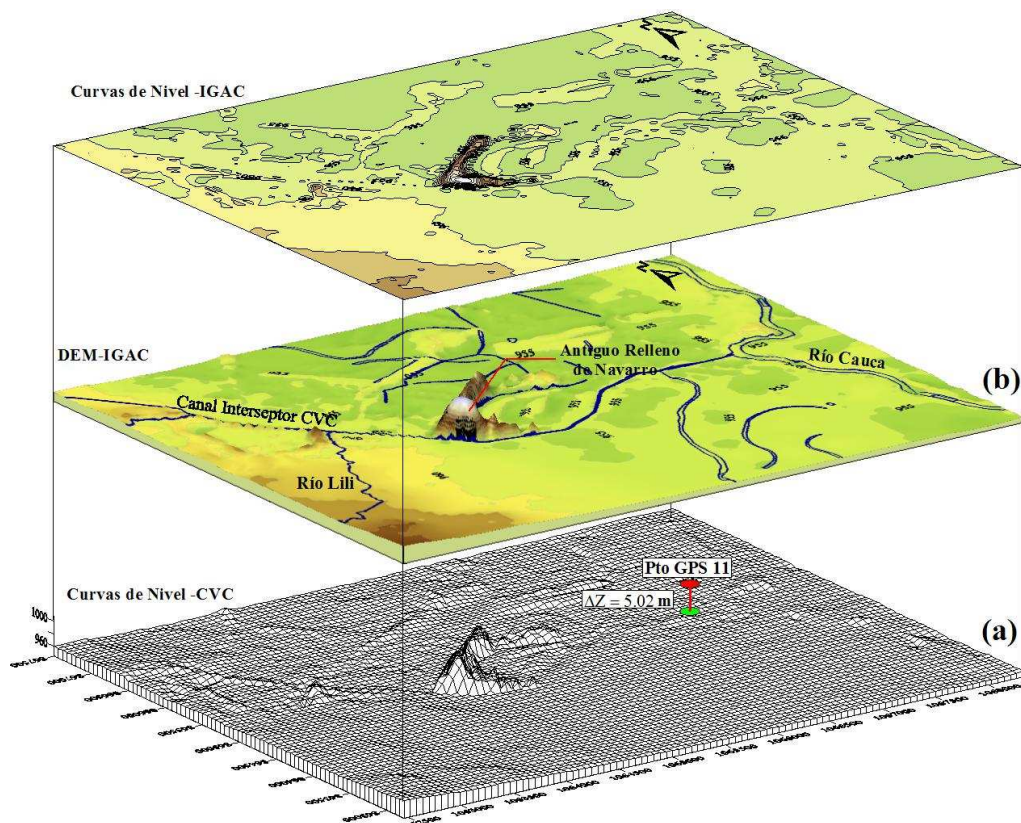


Figura 3.1 Proceso de unificación de sistema topográfico y DEM

### 3.1.3 Aplicación del sistema de información geográfica (SIG)

Como se ha mencionado anteriormente, la construcción de un SIG permite realizar una importante gestión en el almacenamiento, manejo, procesamiento y análisis de los diferentes tipos de datos. Facilita la elaboración o edición de mapas temáticos en base a la información existente y/o generada (mapas de curvas equipotenciales, mapas de vulnerabilidad de acuíferos, localización de pozos de explotación y monitoreo, y otros elementos).

Por tal razón se consideró oportuno realizar una aplicación para la zona de estudio, la cual tuvo como principal objetivo ordenar, en diferentes capas temáticas, los productos obtenidos al formular el modelo conceptual del sistema acuífero.

La aplicación -que se realizó bajo el formato del software Arc-Gis 9- recibió el nombre de “*zona\_estudio.mxd*” y se adjunta a esta presentación en el CD anexo. En el subdirectorio *CD:\arcgis\aplicacion* se encuentran las diferentes capas temáticas desarrolladas en formato (\*.shp). En el *Anexo 2. (Instalación del SIG)* se explica la instalación de este CD.

La ventana principal de la aplicación se muestra en la Figura 3.2. Sobre el costado izquierdo de esa pantalla se ubican las diferentes capas temáticas construidas, las que se pueden activar o desactivar para ser visualizadas. En la parte central de esta ventana se localizan las distintas capas activas de la aplicación. En este caso: ubicación del relleno, pozos de bombeo, red de drenaje, curvas de nivel. Finalmente, a la derecha, se observa la tabla de atributos de los puntos de observación de agua.

Las capas temáticas desarrolladas durante este proyecto sumaron 20. En la Tabla 3.1 se puede observar la descripción general de cada una de las capas que componen este SIG. Cabe notar que esta información fue elaborada tomando como base la información suministrada y desarrollada por la CVC.

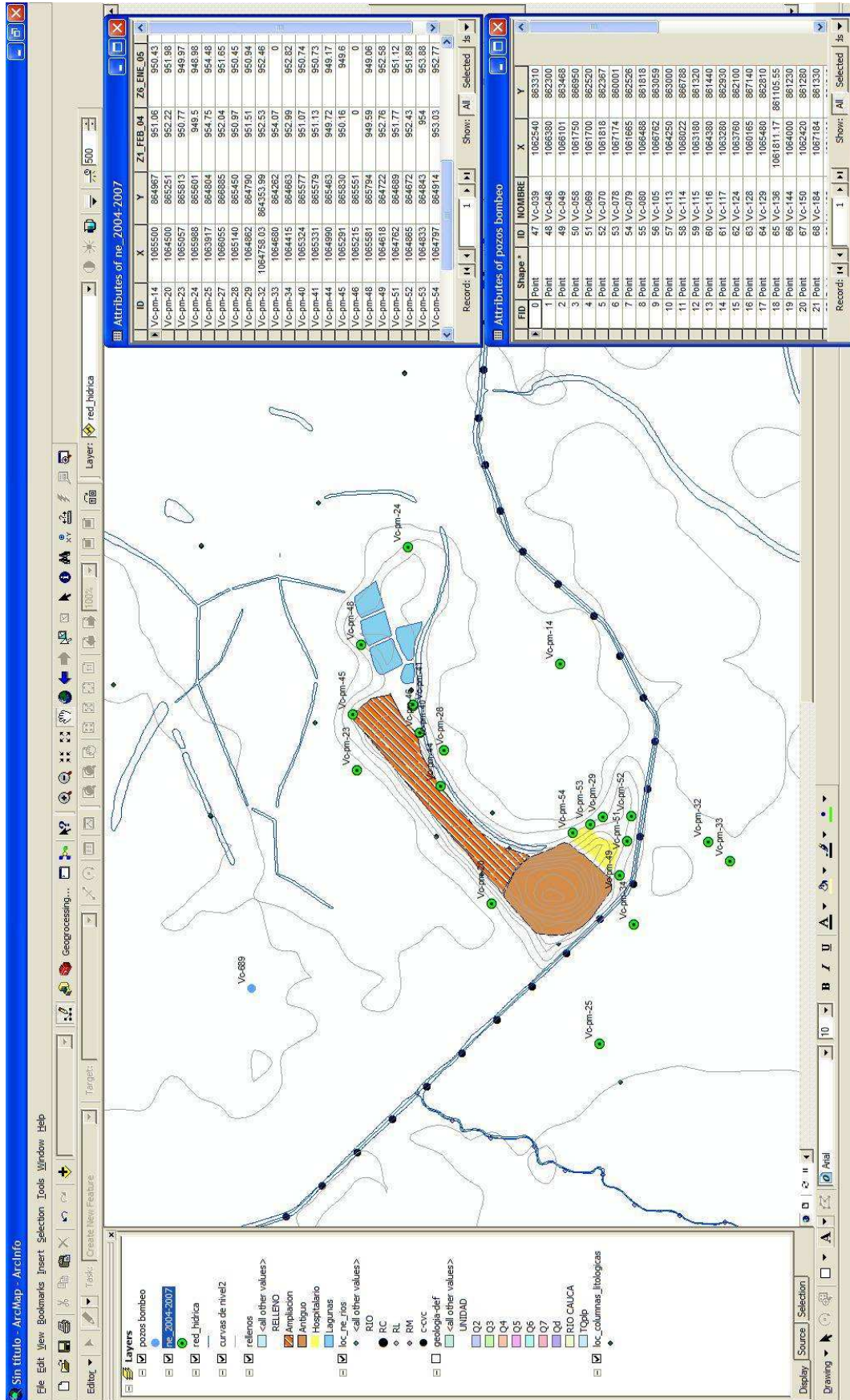


Figura 3.2 Ventana principal de la aplicación “zona\_estudio.apr”

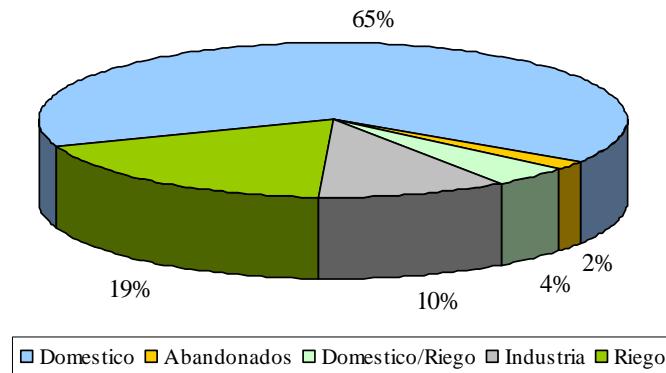
**Tabla 3.1 Descripción de las capas temáticas desarrolladas**

<i>No</i>	<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Archivo</i>	<i>Contiene</i>
1	Puntos de agua	Punto	Ptos de agua.shp	Información de los puntos de observación de agua y principales características
2	Estaciones climatológicas	Punto	Estaciones_clima.shp	Información de localización, tipo, nombre y código de la estación
3	Drenajes	Línea	Drenajes_estudio.shp	Principales ríos y cursos de agua
4	Vías	Línea	Vias.shp	Vías y caminos
5	Curvas de nivel	Línea	Curvas_estudio.shp	Curvas de nivel, equidistancia 1 m
6	Formaciones geológicas	polígono	Formaciones geologicas.shp	Información de carácter geológico e hidrogeológico de las formaciones del área
8	Suelo	polígono	Suelos.shp	Información de los tipos de suelos, unidades y su descripción de aptitud
9	Planchas IGAC	polígono	Planchas.shp	Localización y nombre de las planchas IGAC que describen la zona de estudio
10	Limites de cuenca	polígono	Lim_cuencas_estudio.shp	Localización, área y nombre de cada una de las cuencas que pertenecen a la zona de estudio
11	Municipios	polígono	Munic_estudio.shp	Localización, área y nombre de cada uno de los municipios ubicados en la zona de estudio
12	Veredas	polígono	Veredas_estudio.shp	Localización, área y nombre de cada una de las veredas (*) que forman la zona de estudio
13	Usos del suelo	polígono	Usos-suelo.shp	Localizaron, nombre, área y perímetro de los diferentes usos del suelo
14	Área de estudio	polígono	Área_estudio.shp	Delimitación y superficie del área de estudio
15	Niveles estáticos	Línea	NE_20_Jul_2005.shp	Líneas de nivel estático, registradas en diferentes fechas
16	Líneas de flujo	Línea	FL_20_Jul_2005.shp	Direcciones de flujo correspondientes a cada capa de nivel estático
17	Escenarios transporte	polígono	Pluma_Esc_1.shp	Valores de concentraciones de cloruros de las plumas para cada uno de los escenarios propuestos
18	Transito de partículas	Línea	Transito_particulas.shp	Recorrido de las diferentes partículas asignadas en los diferentes cerros
19	Alternativas de remediación	Línea	Remedia_Alteniva_No1.shp	Presentan los resultados del seguimiento de partículas en las diferentes alternativas propuestas
20	Red monitoreo propuesta	Punto	Red_monitoreo_prop.shp	Localización de los diferentes pozos de monitoreo propuesto



### 3.2 Inventario de puntos de agua (Pozos de Bombeo y Monitoreo)

En los alrededores del área de influencia del antiguo relleno sanitario de Navarro se encuentran ubicados 48 pozos de bombeo empleados para diferentes usos. El 65% de esos pozos está destinado al uso doméstico. Los mismos poseen una profundidad promedio de alrededor de 60 m. El 19% es utilizado para el riego agrícola, principalmente para el cultivo de la caña de azúcar. La profundidad promedio de este tipo de pozos se encuentra en los 90 m. El 10% es usado por la industria, específicamente la del sector de la construcción, el 4% es utilizado en predios pequeños tanto para uso doméstico como para riego de pequeñas parcelas y el 2% restante se encuentran abandonados. La Figura 3.3 muestra la distribución por usos de los pozos profundos del sector.

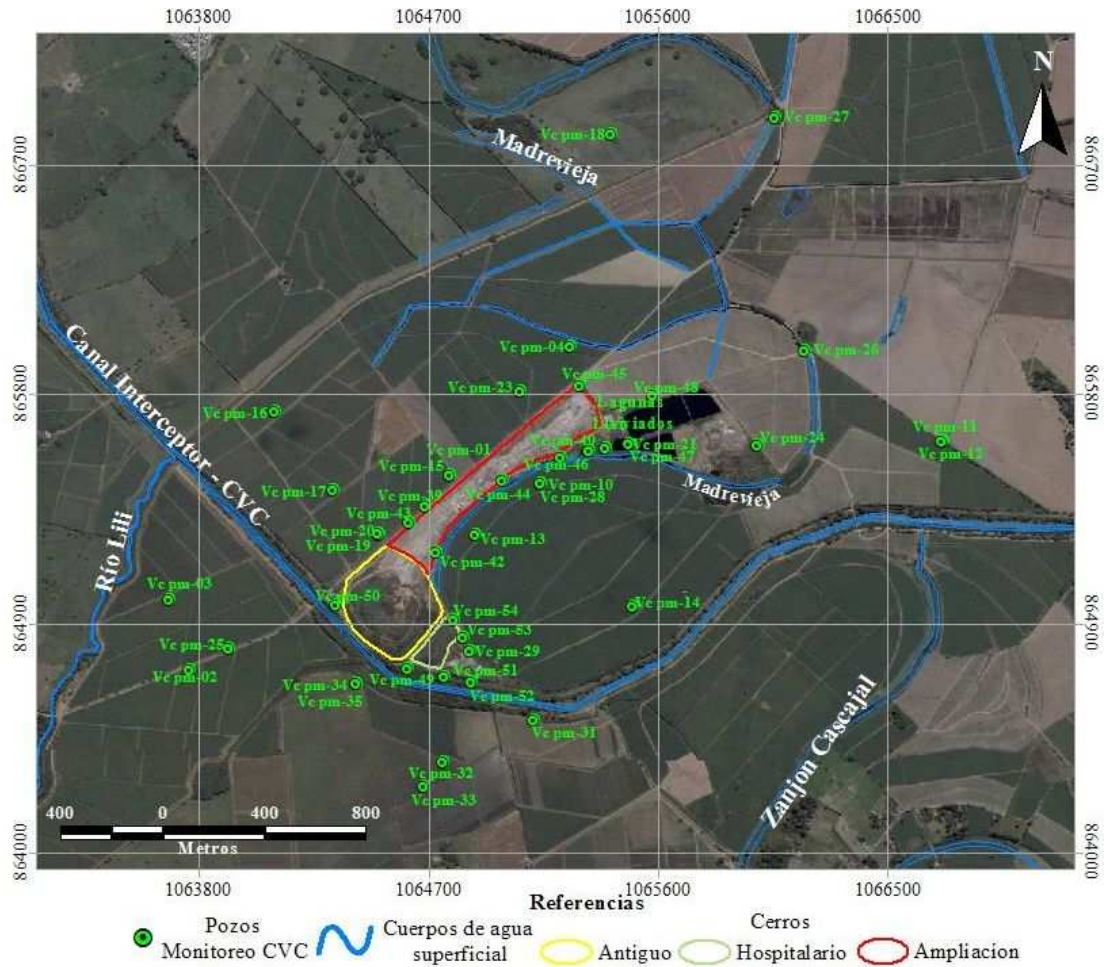


**Figura 3.3 Distribución por usos de pozos profundos**

En cuanto a la ubicación de los diferentes pozos profundos respecto al antiguo relleno de Navarro, el pozo Vc-689 (Figura 3.2) es el más cercano (a una distancia de 1400 m, hacia el sector Norte del relleno). La gran mayoría de los pozos se localizan hacia el sur del relleno, a una distancia promedio de 2000 m, alcanzando profundidades de hasta 112 m (ver Anexo 3. Mapa de localización de puntos de agua seleccionados).

Desde 1997, el Grupo de Aguas Subterráneas de la Subdirección de Gestión Ambiental de la CVC viene monitoreando el nivel estático y calidad de las aguas subterráneas alojadas en el sistema acuífero que subyace al área de influencia del antiguo basurero de Navarro. Para ello construyó una red de monitoreo de agua subterránea constituida por 46 pozos de observación. A su vez, estableció una red para las aguas superficiales y poder así definir su relación con las subterráneas y los posibles impactos. En la Figura 3.4 se puede observar la localización y distribución de los pozos de monitoreo.





**Figura 3.4 Localización y distribución de pozos de monitoreo**

### 3.3 Evolución de Niveles Estáticos

Para la evaluación de los niveles de agua subterránea se seleccionaron los registros de niveles estáticos, correspondientes a los pozos de monitoreo del sector de Navarro medidos por la CVC. Aunque el área presenta gran densidad de puntos de observación cabe mencionar que en algunos existe falta de continuidad del registro de niveles. Las causas son diversas: dificultad en la ubicación del punto de observación; pérdida del pozo por vandalismo; obras de adecuación del terreno en el entorno del relleno sanitario, lo que trae aparejado la modificación de la cota de boca del pozo o, en el peor de los casos, la pérdida total del pozo por enterramiento.

Una vez evaluada la información correspondiente a los niveles estáticos, y depurada la base de datos correspondiente se construyeron los mapas de niveles estáticos y se analizó su evolución temporal.

### 3.3.1 Evolución temporal de niveles estáticos

Tal como se mencionó anteriormente, los niveles de agua subterránea comenzaron a registrarse de manera periódica desde el año 1998. Sin embargo, en algunos pozos estos registros no son continuos. En la Figura 3.5 se observa la evolución de los niveles de los pozos Vc-pm 14, 20, 23, 25, 28 y 29, para un período comprendido entre Oct/1999 y May/2009. Como se puede apreciar el comportamiento del nivel estático en la zona del relleno es dinámico, presentando períodos medianamente estables y otros de ascensos y descensos. Estas variaciones se asocian a los diferentes períodos de precipitación característicos de la zona, a los cuales el conjunto de pozos responde de manera sincroniza. Por otro lado se destaca que durante el período comprendido entre los años 2001 y 2005, los niveles estáticos presentan un comportamiento bastante estable, coincidente con los eventos de precipitación ocurridos en dicho período. Seguidamente se observa un incremento en los montos de precipitación que se ve reflejado en un incremento gradual de los niveles freáticos (Figura 3.5).

Para este período en particular, los mayores niveles estáticos se presentan en el sector *Sur-oeste* (Vc-pm-25) del área de estudio, en donde su valor promedio se encuentra a alrededor de 954,90 m.s.n.m. Hacia el *Nor-oeste* (Vc-pm-20) los niveles presentan un valor medio de 952,60 m.s.n.m. En el sector *Norte* del relleno antiguo (Vc-pm-23) se presentan a, aproximadamente, 950,64 m.s.n.m, y hacia el *Este* (Vc-pm-28), cerca del paleocauce (*Madrevieja*) alcanzan, en promedio, los 951,03 m.s.n.m.

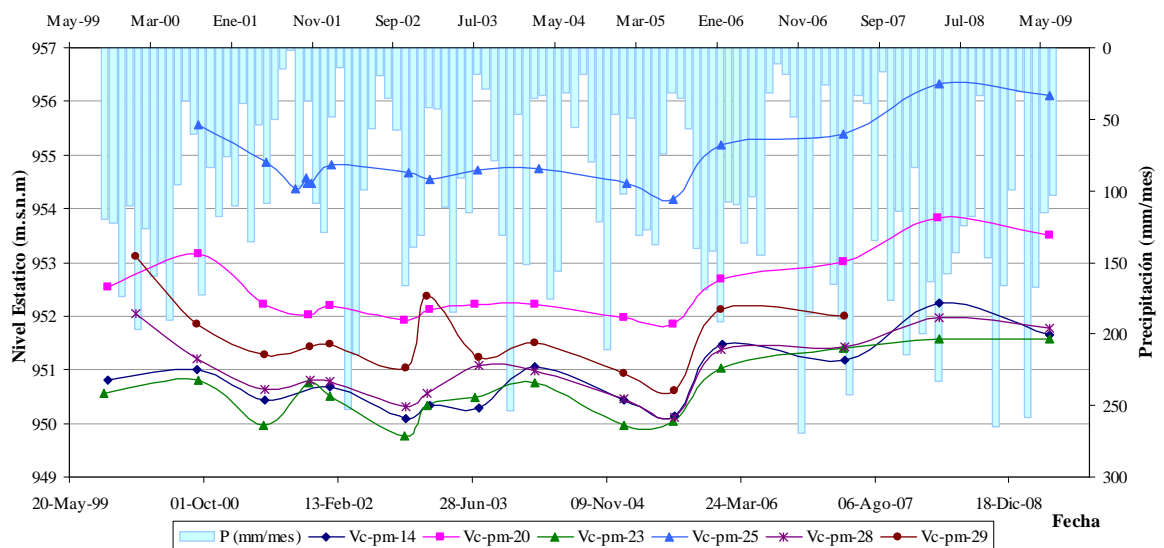


Figura 3.5 Evolución temporal de niveles estáticos

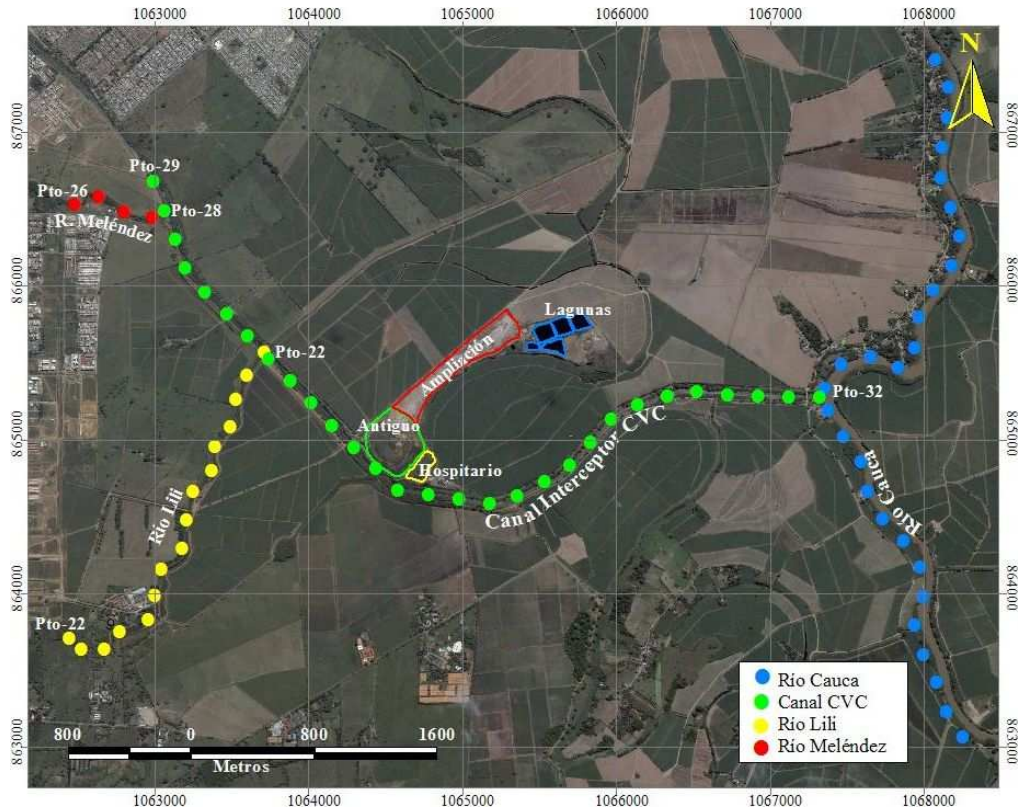
### 3.3.2 Niveles de agua de cuerpos de agua superficial

En los valles de montaña, en donde la relación entre el agua subterránea y superficial afecta tanto los sistemas de flujo local como regional, es importante considerar la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial. Dadas las características geológicas, morfológicas e hidrológicas de la zona de estudio, esta interacción resulta primordial. En estos ambientes es usual que los cursos de agua superficial funcionen como “ganadores” o “perdedores” de flujo hacia el acuífero dependiendo de la estacionalidad de los aportes. A nivel regional, el curso principal funciona, en la mayoría de los casos, como zona de descarga del sistema (Winter *et al.*, 1998). Por lo expuesto reviste sumo interés considerar las alturas del pelo de agua de las corrientes superficiales en las cercanías del relleno y su relación con los niveles acuíferos.

Para la determinación de las alturas del pelo de agua en los ríos Cauca, Meléndez, Lili y Canal Interceptor CVC se contó con información de estaciones limnimétricas ubicadas en cada uno de los cuerpos de agua, aguas arriba y aguas abajo del relleno. Las cotas del pelo de agua se calcularon cada 200 m, considerando una variación lineal entre estaciones (pendiente del pelo de agua = diferencia de nivel entre estaciones / distancia de separación entre ellas).

De acuerdo a los antecedentes y registros disponibles, el río Cauca, principal curso de agua en el área, actúa como un río ganador; es decir, recibiendo la descarga del sistema de flujo subterráneo regional. Para el cálculo de las alturas del pelo de agua sobre este río se utilizaron los registros de las estaciones limnimétricas “*El Hormiguero*” (aguas arriba) y “*Juanchito*” (aguas abajo), separadas una distancia de 26 km. Para el Canal Interceptor CVC se tomaron como referencias (Figura 3.6): el nivel de descarga del canal en el río Cauca (Punto 32) y un punto ubicado 5600 m aguas arriba (Punto 29) de la confluencia. En este tramo, el canal no se encuentra revestido y se asume que el pelo de agua se halla a, aproximadamente, 3 m por encima de la superficie del terreno. Para el cálculo de las alturas de pelo de agua del río Meléndez se utilizaron los registros de la estación limnimétrica “*Calle Quinta*” (aguas arriba) localizada a 5,7 km de su desembocadura en el Canal Interceptor CVC. Para la estimación aguas abajo se tomó como referencia la altura del pelo de agua en el punto de entrega al canal CVC (Punto 28). Finalmente, para los niveles del río Lili, aguas arriba se consideraron los valores leídos en la estación limnimétrica “*Pasoancho*”, ubicada a 7,2 km de la desembocadura del río Lili en el Canal

CVC; y aguas abajo, la cota de pelo de agua en el punto 22 del Canal Interceptor. En la Figura 3.6 se muestran los diferentes puntos en los cuales se estimaron los niveles de pelo de agua de los principales cuerpos de agua superficial.



**Figura 3.6 Localización de niveles de agua superficial en ríos**

En el *Anexo 4* se presentan los niveles mensuales de la superficie de los cuerpos de agua para el período de registro 1987 – 2006, calculados para los principales cursos de agua aledaños al relleno sanitario de Navarro.

### 3.3.3 Mapas de niveles estáticos

Para la elaboración de los mapas de niveles estáticos se utilizó la información de niveles de agua registrados en los pozos de monitoreo del sector y los niveles del cauce de los principales cursos de agua cercanos al relleno de Navarro. Estos últimos se calcularon por diferencia entre la cota del pelo de agua de los cursos en un punto determinado y el tirante de agua en dicho punto.

Con el propósito de construir un mapa de niveles representativo del área de estudio, y analizar su evolución, de la serie de datos proporcionada por CVC se seleccionaron aquellos pozos de monitoreo que incluyeran la mayor cantidad de registros posibles. Es así que se escogieron 20 pozos de observación, con los cuales se elaboraron los mapas de

niveles estáticos para las siguientes fechas: febrero de 2004, enero de 2005, julio de 2005, enero de 2006 y abril de 2007.

En la Tabla 3.2 se pueden observar los diferentes niveles estáticos para los pozos seleccionados en las respectivas fechas mencionadas.

**Tabla 3.2 Localización y registro de niveles estáticos pozos de monitoreo.**

Pozo	X	Y	21 Feb 04	16 Ene 05	20 Jul 05	14 Ene 06	13 Abr 07
Vc-pm-14	1065500	864967	951.06	950.43	950.15	951.47	951.19
Vc-pm-20	1064500	865251	952.22	951.98	951.84	952.69	953.02
Vc-pm-23	1065057	865813	950.77	949.97	950.03	951.04	951.41
Vc-pm-24	1065988	865601	949.50	948.98	948.56	949.84	950.06
Vc-pm-25	1063917	864804	954.75	954.48	954.18	955.18	955.38
Vc-pm-27	1066055	866885	952.04	951.65	951.69	952.63	952.74
Vc-pm-28	1065140	865450	950.97	950.45	950.11	951.37	951.43
Vc-pm-29	1064862	864790	951.51	950.94	950.62	952.12	952.00
Vc-pm-32	1064758	864354	952.53	952.46	952.16	952.54	953.12
Vc-pm-34	1064415	864663	952.99	952.82	952.52	953.06	953.79
Vc-pm-40	1065324	865577	951.07	950.74	950.94	951.64	951.84
Vc-pm-41	1065331	865579	951.13	950.73	950.67	951.53	951.85
Vc-pm-44	1064990	865463	949.72	949.17	948.82	949.92	950.11
Vc-pm-45	1065291	865830	950.16	949.60	949.44	949.97	950.51
Vc-pm-48	1065581	865794	949.59	949.06	949.15	949.61	950.10
Vc-pm-49	1064618	864722	952.76	952.58	952.16	953.36	953.24
Vc-pm-51	1064762	864689	951.77	951.12	951.04	952.46	952.11
Vc-pm-52	1064865	864672	952.43	951.89	951.81	953.23	952.25
Vc-pm-53	1064833	864843	954.00	953.88	953.10	954.93	954.71
Vc-pm-54	1064797	864914	953.03	952.77	952.43	953.87	953.83

Las mismas fechas de registro de niveles de agua subterránea se seleccionaron para la obtención del registro de cota de pelo de agua en los cursos superficiales. De esta manera se generó el conjunto de datos para la elaboración de los mapas de niveles estáticos.

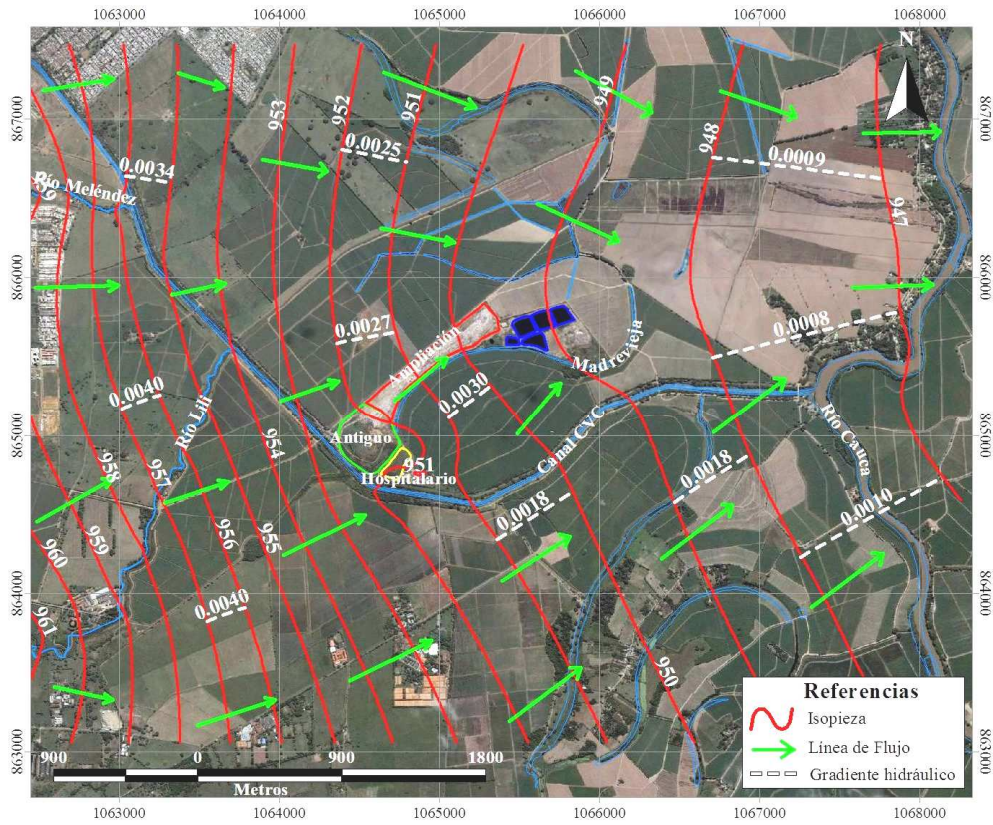
En términos generales, el comportamiento de los niveles estáticos en el área de estudio es coincidente con el comportamiento del flujo regional; es decir presenta un gradiente que decrece gradualmente hasta las cercanías del río Cauca. La Figura 3.7(a) muestra el comportamiento de los niveles estáticos para el mes de Julio de 2005. La fecha

corresponde a un mes de bajas precipitaciones (verano). En dicha figura se puede observar que los mayores niveles se presentan en el sector *Oeste* alcanzando los 960 m.s.n.m, mientras que las menores se presentan en el sector *Este*, en las cercanías del río Cauca, a una altura de 947 m.s.n.m. En las proximidades del antiguo relleno se puede observar la alteración de la configuración de las curvas equipotenciales, reflejando la variación producida por el pasaje del flujo a través del paleocauce del río Cauca.

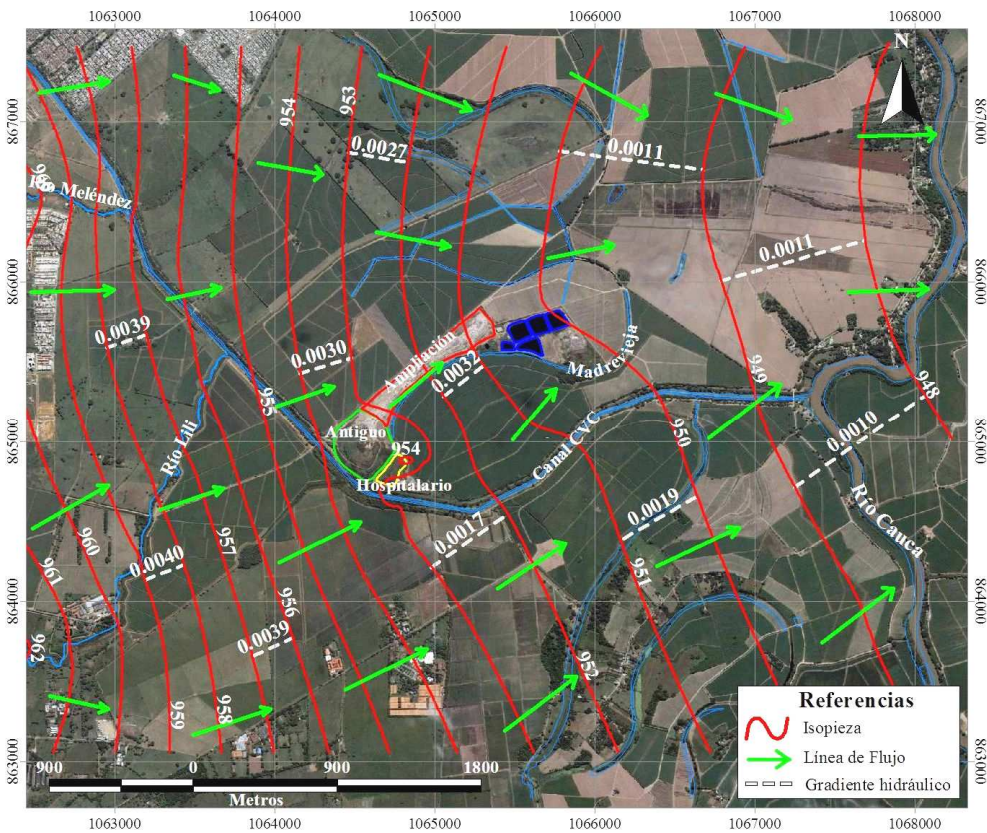
Por otro lado, la Figura 3.7(b) muestra los niveles registrados en Abril de 2007, mes que se corresponde con un período de altas precipitaciones (invierno). En primera instancia se observa un aumento en los valores de los niveles estáticos del área lo cual resulta razonable teniendo en cuenta la posibilidad de una tasa de recarga potencial por efecto de las lluvias en el período. Los mayores niveles se presentan hacia el *Oeste* de la zona en donde alcanzan una altura de 961 m.s.n.m mientras que los menores se presentan en las cercanías del río Cauca, con un valor de alrededor de 948 m.s.n.m. Sobre el área del antiguo relleno sanitario se destaca que se presenta un nivel máximo de 954 m.s.n.m, el cual se localiza entre los cerros Antiguo y Hospitalarios, indicando la presencia de un pequeño domo. Este domo posiblemente se generó por la recarga que imprimen en el sector los lixiviados producidos por ambos cerros.

Para la estimación del gradiente hidráulico en cada uno de estos mapas se seleccionaron tres áreas, a las que se denominó *Oeste*, *Central* y *Este*. Como puede observarse en la Figura 3.7 (a) y (b), en ambos mapas, y para cada sector, se estimaron valores de gradiente hidráulico muy similares. El sector *Oeste* presenta un valor promedio de 0,004 m/m. Hacia las cercanías del relleno el gradiente toma valores entre 0,0027 m/m y 0,0030 m/m. Finalmente, hacia las estribaciones del río Cauca, se presentan los valores más bajos de gradiente hidráulico, el que oscila alrededor de 0,0011 m/m.





(a) Niveles estáticos – 20 de Julio de 2005



(b) Niveles estáticos – 13 de Abril de 2007

**Figura 3.7 Niveles estáticos, direcciones de flujo y gradientes hidráulicos – Antiguo relleno de Navarro**



### 3.4 Balance hídrico

El establecimiento de un balance hídrico, y su cuantificación, es uno de los aspectos más importantes en una caracterización hidrogeológica. Para su elaboración, es imprescindible plantear el modelo conceptual sobre el funcionamiento del sistema objeto de estudio (Fraile *et al.*, 2009).

El balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad, sobre una región definida por ciertas condiciones de borde y durante un período de tiempo determinado. En ese volumen se establece que la diferencia entre las entradas y salidas del sistema que se ha definido es el resultado de la variación del volumen de agua almacenada.

La ecuación general de balance, en un acuífero, para un intervalo de tiempo, presenta la siguiente expresión (Custodio y Llamas, 1996):

$$P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - \Delta S = 0 \quad (3-2)$$

En donde:

P : Precipitación

$Q_{se}$  : Caudal Superficial entrante

$Q_{te}$  : Caudal subterráneo entrante

E : Evapotranspiración real

$Q_{ss}$  : Caudal superficial saliente

$Q_{ts}$  : Caudal subterráneo saliente

$\Delta S$  : Variación de almacenamiento (inicial – final)

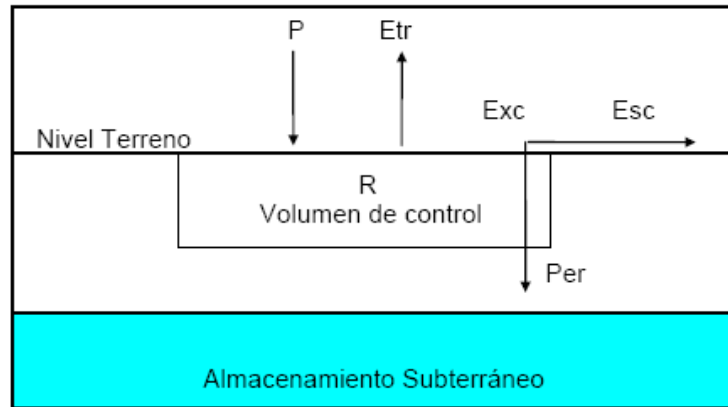
Para la resolución de la ecuación (3-2) en la zona de estudio se cuenta con mediciones directas de algunos de sus términos (precipitación, caudal superficial entrante). Mientras que el resto debe ser evaluado mediante diversos métodos específicos.

En función de lo expuesto, de la información disponible, y con el objetivo de estimar un valor de recarga al sistema acuífero que incremente su volumen de agua por percolación directa vertical a través de la zona no saturada se plantea el cálculo de un balance hidrometeorológico a paso mensual.

#### 3.4.1 Balance hídrico mensual

La estimación de la recarga al sistema hídrico subterráneo se realiza a partir del planteamiento de un balance hídrico a paso mensual con el esquema presentado en la

Figura 3.8. Para ello se considera que la recarga al sistema está representada por el valor de percolación al acuífero ( $Exc = Esc + Per$ ).



**P** : precipitación, **Etr**: evapotranspiración real, **Exc**: exceso de agua ( $Exc = Esc + Per$ ), **Esc**: Escorrentía directa, **Per**: Percolación al acuífero, **R**: reserva de agua utilizable por las plantas.

**Figura 3.8** Esquema del volumen de control y variables consideradas en el balance  
Fuente: (Pedraza, 2008)

La ecuación de balance aplicada al volumen de control en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es:

$$P = Etr + Exc + \Delta R \quad (3-3)$$

En donde:

**P**: Precipitación [L/t]

**Etr**: Evapotranspiración real [L/t]

**Exc**: Excesos [L/t]

**$\Delta R$** : Variación de la reserva de agua utilizable por las plantas [L/t]

Para la aplicación de la expresión (3-3) se aplican las siguientes restricciones:

$$Etr \leq Etp \quad (3-4)$$

en donde la “*Etp*” es la evapotranspiración potencial.

$$0 \leq R \leq R_{max} \quad (3-5)$$

**R** es la reserva de agua utilizable por las plantas. Sus valores varían entre cero y  $R_{max}$ ; esta última se calcula como la diferencia entre el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y el contenido de humedad en el punto de marchitez permanente.

Las características hídricas de los suelos de la zona han sido determinadas en estudios llevados a cabo por CENICAÑA (Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia). Los suelos del área son de tipo *Mollisoles*, pertenecientes a la serie “Río

Cauca” (*Fluventic Haplustoll*), de textura franco-arcillosa (*F-Ar*), con una reserva máxima de agua utilizable entre 0,6 y 1.0 mm/cm (CENICAÑA, 1995). El valor asumido para el cálculo es 0,8 mm/cm.

La profundidad radicular máxima ( $P_{rad}$ ), en función de evaluaciones de campo, es de 80 cm. Por consiguiente, el valor de  $R_{max}$  que se utilizó para el cálculo del balance hídrico fue de 64 mm, obtenido con la siguiente relación:  $R_{max} = P_{rad} \times 0,8 \text{ mm/cm}$ .

### 3.4.1.1 Procedimiento de Cálculo

Los datos de entrada que se utilizaron para el cálculo del balance hídrico son: la precipitación media mensual y la evaporación potencial media mensual de la estación Meléndez de CENICAÑA, correspondientes al período (1994-2010). Los datos de evaporación fueron obtenidos de mediciones directas efectuadas en un tanque clase A. Por tal motivo la estimación de la evapotranspiración potencial ( $Etp$ ) se realizó por medio de la expresión (ASCE, 1978, Doorenbos y Pruitt, 1976):

$$Etp = K_c \times E_{tanque} \quad (3-6)$$

En donde,  $K_c$ : Factor de cultivo (CENICAÑA, 1995) y  $E_{tanque}$ : evaporación del tanque clase A. El valor de  $K_c$  que se utiliza actualmente es de  $K_c = 0,3$  para cañas menores de 4 meses, y  $K_c = 0,7$  para cultivos de caña entre 4 y 10 meses (Cruz Valderrama *et al.*, 2009). Para el presente estudio se seleccionó un valor de  $K_c = 0,7$ .

De acuerdo a la relación mensual entre  $P$  y  $Etp$  se consideraron dos situaciones posibles:

- a)  $P \geq Etp$  ( $P - Etp \geq 0$ ):  $Etp$  se satisface con  $P$  ( $Etr = Etp$ ). El excedente de agua aumenta la reserva de agua útil ( $\Delta R$  positiva). Si se completa la reserva máxima  $R_{max}$  y sigue existiendo sobrante, éste pasa a ser exceso (escurrimiento directo más percolación).
- b)  $P < Etp$  ( $P - Etp < 0$ ):  $Etp$  no se satisface con  $P$ ; el almacenamiento suministra agua para satisfacer los requerimientos ( $Etr = P + \Delta R$ ) y, por ende, disminuye la reserva ( $\Delta R$  negativa).  $R$  tiene un límite mínimo igual a cero. Cuando la reserva se agota y la  $Etp$  aún no se ha satisfecho, se produce un déficit ( $Déf$ ).

Para un mes genérico  $i$ ,  $\Delta R$  se calcula como se describe a continuación (Pedraza, 2008):

Si  $(P - Etp)_i < 0$ :

$$\text{Si } |P - Etp|_i \leq R_{i-1} \Rightarrow \Delta R_i = |P - Etp|_i \quad (3-7)$$

$$\text{Si } |P - Etp|_i > R_{i-1} \Rightarrow \Delta R_i = -R_{i-1} \quad (3-8)$$

Si  $(P - Etp)_i \geq 0$ :

$$\text{Si } (P - Etp)_i \leq (R_{\max} - R_{i-1}) \Rightarrow \Delta R_i = (P - Etp)_i \quad (3-9)$$

$$\text{Si } (P - Etp)_i > (R_{\max} - R_{i-1}) \Rightarrow \Delta R_i = R_{\max} - R_{i-1} \quad (3-10)$$

En cualquiera de estos casos, el valor de  $R$  se actualiza al final del mes  $i$  con:

$$R_i = R_{i-1} + \Delta R_i \quad (3-11)$$

Finalmente, se calcularon los valores de  $Etr$ ,  $Exc$  y  $Def$  para el mes  $i$ :

$$\text{Si } (P - Etp)_i \leq 0 \Rightarrow Exc_i = 0 \quad (3-12)$$

$$\text{Si } (P - Etp)_i > 0 \Rightarrow Exc_i = (P - Etp)_i - \Delta R_i \quad (3-13)$$

$$\text{Si } (P - Etp)_i < 0 \Rightarrow Etr_i = P_i + |\Delta R_i| \quad (3-14)$$

$$\text{Si } (P - Etp)_i \geq 0 \Rightarrow Etr_i = Etp_i \quad (3-15)$$

$$Def_{ii} = Etp_i - Etr_i \quad (3-16)$$

### 3.4.1.2 Resultados del balance Hídrico

En la Tabla 3.3 se presenta el cálculo del balance hídrico realizado para el área de estudio.

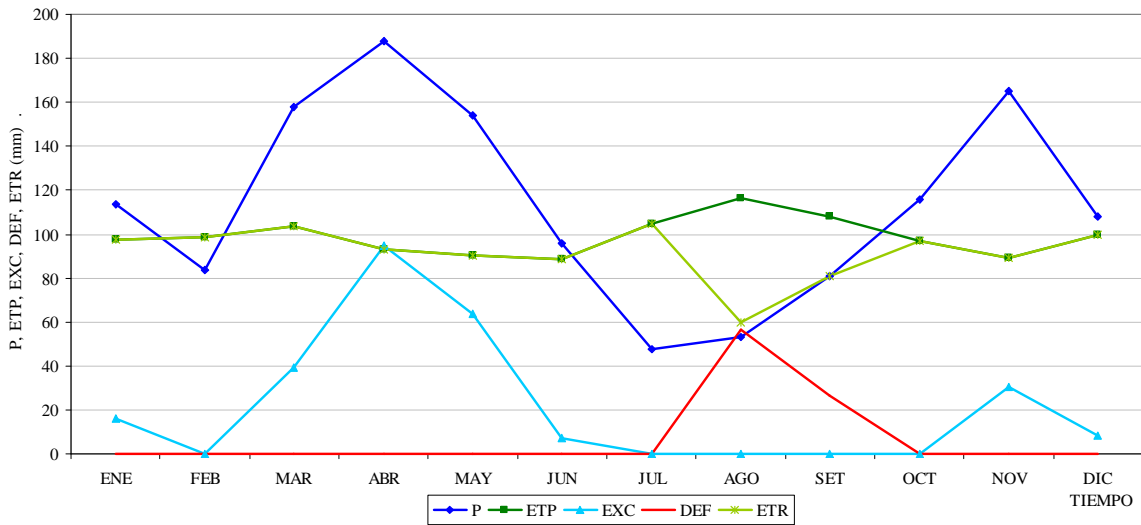
**Tabla 3.3 Cálculo del balance hídrico mensual (mm/mes) - Período (1994-2010).**

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>P</b>	113.6	83.5	158.0	187.9	154.0	95.6	47.7	53.1	81.0	116.0	165.0	108.2	<b>1363.6</b>
<b>Ev</b>	139.5	140.7	147.8	133.3	128.7	126.6	149.9	165.9	154.0	138.5	127.7	142.8	<b>1695.2</b>
<b>Etp</b>	97.6	98.5	103.4	93.3	90.1	88.6	104.9	116.1	107.8	96.9	89.4	100.0	<b>1186.7</b>
<b>P-Etp</b>	16.0	-15.0	54.6	94.6	64.0	7.1	-57.3	-63.0	-26.8	19.1	75.6	8.2	
<b>ΔR</b>	0.0	15.0	15.0	0.0	0.0	0.0	57.3	6.7	0.0	19.1	44.9	0.0	
<b>R</b>	64.0	49.0	64.0	64.0	64.0	64.0	6.7	0.0	0.0	19.1	64.0	64.0	
<b>Exc</b>	16.0	0.0	39.6	94.6	64.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	30.7	8.2	<b>260.0</b>
<b>Def</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	56.3	26.8	0.0	0.0	0.0	<b>83.0</b>
<b>Etr</b>	97.6	98.5	103.4	93.3	90.1	88.6	104.9	59.9	81.0	96.9	89.4	100.0	<b>1103.6</b>

El gráfico con los resultados del balance se muestra en la Figura 3.9. En particular, para el área de estudio se presentan dos períodos de excesos. El más significativo ocurre entre los meses de Marzo a Junio con un total de 205 mm; el segundo a partir del mes de Noviembre a Enero con un valor de 55 mm. Por lo tanto, para un año promedio, en la zona se genera

un exceso (*Exc*) de 260 mm. En función de las consideraciones realizadas para la aplicación del método, y de las características de la zona de estudio, en especial lo referente a los usos del territorio y la profundidad del nivel freático, el monto de exceso estimado estará disponible como recarga potencial al sistema acuífero (*Per*).

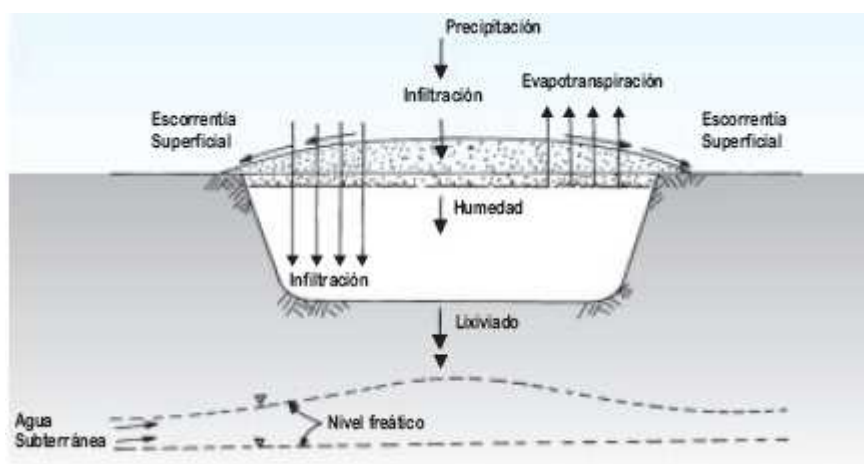
Por otro lado, el período de déficit se presenta entre los meses de Agosto y Septiembre. Contabiliza un total de 83 mm. El mismo muy seguramente es suplido por el riego con pozos profundos de la zona.



**Figura 3.9 Balance hídrico estación Meléndez (CENICAÑA)  
 Período (1994-2010)**

### 3.5 Balance de lixiviados

La cantidad o volumen de lixiviado que podría generar un relleno sanitario se puede calcular mediante un balance hídrico. Numerosos estudios han basado su determinación a través de este método (Velásquez *et al.*, 2003; Berger, 2000; Tchobanoglous *et al.*, 1994 y EPA, 1975). El balance debe incluir el cómputo de todos los flujos líquidos que ingresan y salen del relleno sanitario, además del almacenado en el mismo. El mayor componente de la fase líquida que ingresa al relleno sanitario es la precipitación y, en segundo término, el agua contenida en los residuos sólidos. El flujo más importante que sale del relleno sanitario es el lixiviado (Salvato, 1971). La Figura 3.10 presenta un esquema general del balance hídrico en un relleno sanitario.



**Figura 3.10** Esquema del balance hídrico en un relleno sanitario

Fuente: (Min-Ambiente Colombia, 2002)

Cruz (2002) asegura que una predicción exacta del flujo de lixiviados es muy difícil de lograr debido a las incertidumbres asociadas a la estimación de algunas de las variables, tanto en la fase líquida como en la de almacenamiento dentro del relleno. Esta incertidumbre tiene que ver, en primera instancia, con las características de la cubierta de los residuos, el tipo de suelo y vegetación, el grado de compactación y las pendientes superficiales. Por otro lado, también tiene su incidencia el tipo de residuo, su compactación, composición y contenido de humedad. En el caso particular de Navarro se debe añadir que fue un relleno que funcionó por muchos años sin tener en cuenta normas técnicas para la disposición y adecuación de residuos por lo que la estimación de los lixiviados resulta aún más dificultosa.

En función de lo expuesto anteriormente, en el presente estudio se aplicó el método del balance hídrico para determinar la cantidad de lixiviados que produce el antiguo relleno sanitario de Navarro. Para el cálculo se consideraron las siguientes hipótesis:

- La precipitación cae sobre el área efectiva de cada uno de los cerros que componen el relleno (antiguo, de hospitalarios y ampliación), los que no poseen cobertura impermeable en superficie,
- La cantidad de agua que se pierde en la superficie del relleno es debida a la evapotranspiración real,
- Los excesos resultantes del balance hídrico ( $Exc = Per$ ), en el área del vertedero constituyen la cantidad de agua disponible para producir lixiviados ( $Exc = Lix$ ),
- Los primeros lixiviados se producen una vez que los residuos sólidos han retenido toda el agua posible, es decir cuando la variación de humedad es nula por estar saturados,

- El agua perdida por las reacciones anaeróbicas es despreciable comparadas con el aporte de agua debido a la precipitación.

Por lo tanto la cantidad probable de lixiviado ( $Lix$ ) puede ser estimada modificando la expresión (3-3) de la siguiente manera:

Teniendo en cuenta que  $Exc = Lix$ , entonces:

$$Lix = P - Ro - Etp - \Delta R_{RS} \quad (3-17)$$

En donde:

$P$ : Precipitación [L/t]

$Ro$ : Fracción de agua que escurre superficialmente (cobertura impermeable del relleno) [L/t]

$Etp$ : Evapotranspiración potencial [L/t]

$\Delta R_{RS}$ : Variación de humedad de los residuos sólidos [L/t]

Para obtener el volumen de lixiviado ( $Q_{lm}$ ) se multiplica la lámina obtenida con la expresión (3-17) por el área superficial del respectivo relleno ( $A_{relleno}$ ):

$$Q_{lm} = Lix \times A_{relleno} \quad (3-18)$$

### 3.5.1 Calculo de la generación de lixiviado

Sobre la base de los resultados del balance hídrico (Tabla 3.3), las hipótesis expuestas anteriormente y la aplicación de la expresión (3-18), se estimó el volumen de lixiviados generado ( $Q_{lm}$ ) para los tres cerros que conforman el Relleno Sanitario de Navarro.

Para cuantificar los lixiviados se consideraron dos situaciones:

1. La generación del lixiviado se calcula a partir de los rellenos sin clausurar (sin cobertura). Para esta situación se considera que  $Ro = 0$ , es decir no existe flujo desde el relleno por escorrentía superficial y  $\Delta R_{RS}$ , es igual a las variaciones del contenido de humedad del suelo natural de la zona.
2. La estimación de lixiviados se realiza a partir de la clausura del relleno (mediados de 2008) por lo que es de esperar que el volumen de lixiviado generado disminuya. El agua que ingresa a cada uno de los cerros que componen el relleno ya no será, exclusivamente, la debida a la precipitación. Las tareas de adecuación de la superficie (coberturas y barreras impermeables) provocarán escorrentía superficial.



A su vez, se produce una reducción en la variación de humedad de los residuos sólidos debida a su compactación.

En la Tabla 3.4 se presentan las áreas y los volúmenes de lixiviados producidos por los cerros que componen el Relleno Sanitario de Navarro para la primera situación. El período de tiempo considerado fue un año. De acuerdo a los cálculos realizados los mayores volúmenes de lixiviado son producidos por el Cerro de Ampliación, con un volumen diario estimado de 87,49 m<sup>3</sup>/día. En el Cerro Antiguo, la tasa de generación alcanzó los 82,18 m<sup>3</sup>/día y en el Cerro de Hospitalarios, 13 m<sup>3</sup>/día. Para un total de 182,68 m<sup>3</sup>/día, 95,19 m<sup>3</sup>/día ingresarían como lixiviados directamente al sistema acuífero más próximo a la superficie del terreno (los cerros Antiguo y Hospitalario no se encuentran impermeabilizados).

**Tabla 3.4 Generación de lixiviados en los rellenos sin clausurar (anual).**

<i>Relleno</i>	<i>Área (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Q<sub>lm</sub> (m<sup>3</sup>/año)</i>	<i>Q<sub>lm</sub> (m<sup>3</sup>/día)</i>	<i>Q<sub>lm</sub> (l/seg)</i>
Antiguo	115360	29995	82.18	0.95
Hospitalario	18261	4748	13.01	0.15
Ampliación	122822	31935	87.49	1.01
<b>Total</b>	<b>256443</b>	<b>66678</b>	<b>182.68</b>	<b>2.11</b>

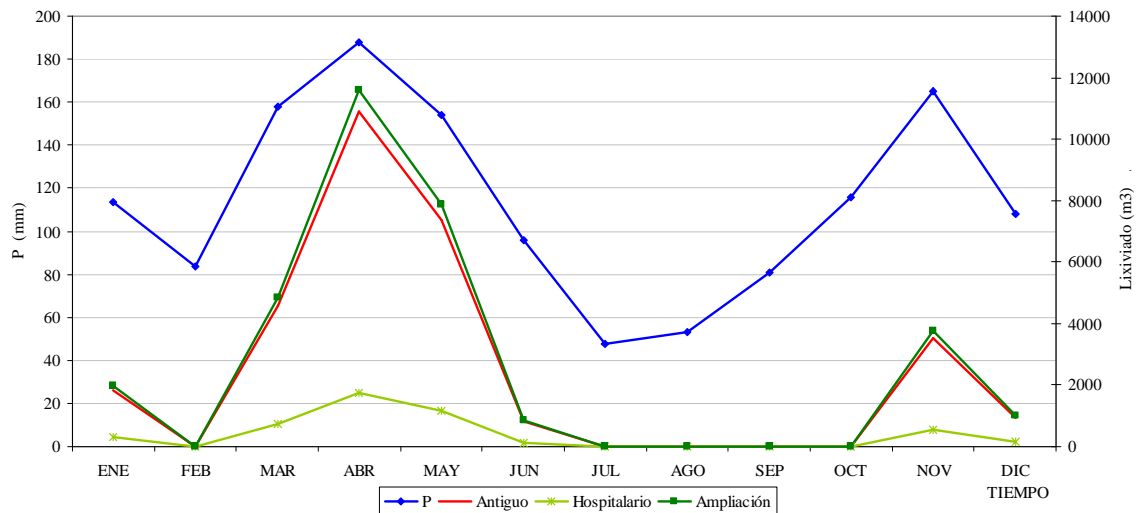
La Tabla 3.5 presenta los volúmenes de lixiviados para cada uno de los cerros a nivel mensual. En la misma se pudo notar la relación existente entre los meses con precipitación y la posible producción de lixiviados.

**Tabla 3.5 Volumen de lixiviados en los rellenos sin clausurar (mensual).**

<i>Relleno</i>	<i>Volumen de Lixiviado (m<sup>3</sup>/mes)</i>												<i>Anual (m<sup>3</sup>/año)</i>
	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>	
Antiguo	1841.2	0.0	4565.1	10908.3	7378.0	813.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3545.5	943.5	<b>29995</b>
Hospitalario	291.5	0.0	722.6	1726.8	1167.9	128.7	0.0	0.0	0.0	0.0	561.3	149.4	<b>4748</b>
Ampliación	1960.2	0.0	4860.4	11613.8	7855.2	865.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3774.8	1004.5	<b>31935</b>

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos Tabla 3.3.*

La Figura 3.11 muestra la generación de lixiviados a nivel mensual. De acuerdo a Jaramillo (2002) la producción de lixiviados se origina durante los períodos de lluvia y se prolonga por unos días luego del evento. En área de estudio, en función de los excesos registrados, se presentan dos períodos de producción de lixiviados. El primero entre los meses de Marzo a Junio, en donde el Cerro Antiguo genera 23665 m<sup>3</sup>, el de Hospitalarios 3746 m<sup>3</sup> y el de Ampliación 25195 m<sup>3</sup>. El segundo período de producción de lixiviados se presenta durante los meses de Noviembre a Enero, en donde los tres cerros producen un total de 14072 m<sup>3</sup>.



**Figura 3.11 Producción de lixiviados para cada uno de los rellenos sin clausurar**

Para la segunda situación (generación de lixiviados considerando el cierre del relleno) se aplican nuevamente las expresiones (3-17) y (3-18) con las siguientes consideraciones (Tchobanoglous *et al.*, 1994):

- $R_o = 0,3P$ ; se considera que las coberturas y barreras impermeables reducirán en un 30% la entrada de agua al relleno por precipitación.
- $\Delta R_{RS}$ ; se considera que las labores de compactación de los residuos sólidos reducirán un 50% la condición de humedad inicial, es decir  $\Delta R_{RS} = 32mm$ .

Con estas consideraciones se realizó el cálculo del balance hídrico para la estimación de lixiviados en los rellenos clausurados (Tabla 3.6). La lámina de lixiviados así estimada es de 31,1mm/año.

**Tabla 3.6 Calculo del balance hídrico rellenos clausurados**

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>P</b>	113.6	83.5	158.0	187.9	154.0	95.6	47.7	53.1	81.0	116.0	165.0	108.2	<b>1363.6</b>
<b>Ro</b>	34.1	25.0	47.4	56.4	46.2	28.7	14.3	15.9	24.3	34.8	49.5	32.4	<b>409.1</b>
<b>Ev</b>	139.5	140.7	147.8	133.3	128.7	126.6	149.9	165.9	154.0	138.5	127.7	142.8	<b>1695.2</b>
<b>Etp</b>	97.6	98.5	103.4	93.3	90.1	88.6	104.9	116.1	107.8	96.9	89.4	100.0	<b>1186.7</b>
<b>P-Ro-Etp</b>	-18.1	-40.0	7.2	38.2	17.7	-21.6	-71.6	-78.9	-51.1	-15.7	26.1	-24.3	
<b>ΔR</b>	1.9	0.0	7.2	24.8	0.0	21.6	10.4	0.0	0.0	0.0	26.1	24.3	
<b>R</b>	0.0	0.0	7.2	32.0	32.0	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	26.1	1.9	
<b>Lix</b>	0.0	0.0	0.0	13.3	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>31.1</b>
<b>Def</b>	16.2	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61.2	78.9	51.1	15.7	0.0	0.0	<b>263.2</b>
<b>Etr</b>	81.4	58.4	103.4	93.3	90.1	88.6	43.7	37.2	56.7	81.2	89.4	100.0	<b>923.4</b>

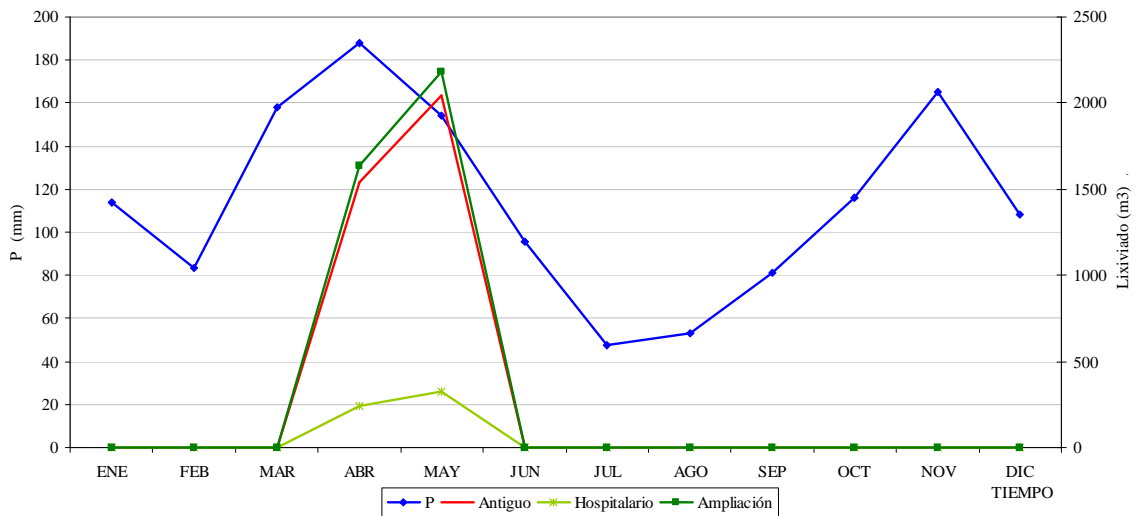
En la Tabla 3.7 se pueden observar los diferentes volúmenes de lixiviados calculados a nivel mensual y anual, para cada uno de los cerros que componen el Relleno de Navarro, una vez clausurados y sellados. El cerro Antiguo generaría un volumen anual de 3587 m<sup>3</sup>, el de Hospitalarios 568 m<sup>3</sup> y el de Ampliación 3819 m<sup>3</sup>.

**Tabla 3.7 Volumen de lixiviados en los rellenos clausurados (mensual).**

Relleno	Volumen de Lixiviado (m <sup>3</sup> /mes)												Anual (m <sup>3</sup> /año)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Antiguo	0.0	0.0	0.0	1539.7	2047.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3587
Hospitalario	0.0	0.0	0.0	243.7	324.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	568
Ampliación	0.0	0.0	0.0	1639.3	2179.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3819

Fuente: Elaboración propia a partir de datos Tabla 3.6.

La Figura 3.12 presenta la producción de lixiviados de cada uno de los cerros. En esta situación es notable la reducción del volumen de lixiviados, generándose un solo período de producción, el que alcanza un volumen de 7973 m<sup>3</sup>/año. Este monto representa una reducción del 88% con relación al volumen de lixiviados generado por el relleno sin clausurar.



**Figura 3.12 Producción de lixiviados para cada uno de los rellenos clausurados**

### 3.6 Procesamiento de información hidroquímica

La interpretación de los datos hidroquímicos de un sistema acuífero permite conocer características fundamentales del agua subterránea como su origen y los procesos modificadores que la afectan. Su vinculación con la hidrogeología tiene como finalidad mejorar la conceptualización y cuantificación de los flujos existentes, y además, poder establecer sus posibles usos (Vázquez Suñé, 2009).

En este contexto, el procesamiento de la información hidroquímica del área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro permitió disponer de datos validados para plantear hipótesis acerca del funcionamiento del sistema acuífero.

En primera instancia se elaboró una base de datos que permitió relacionar la información hidroquímica a nivel espacial (localización del punto) y temporal (fecha de medición). Los datos de los análisis químicos de las muestras de agua subterránea fueron valorados a través del cálculo del balance iónico. Una muestra de agua se consideró aceptable si su error era menor o igual al 10%.

Para este procesamiento se contó con información proveniente de muestras obtenidas en pozos de monitoreo instalados en el sector de Navarro por la CVC. Los registros observados, proporcionados por la Corporación, comprenden el período 1997 – 2009. Sin embargo estos registros han sido discontinuos tanto en espacio como en tiempo; muchos pozos fueron reemplazados y otros han sido adicionados en función de las diferentes adecuaciones que se realizaron en el antiguo relleno de Navarro.

Los análisis físico-químicos realizados por la CVC- contemplan la determinación de características físico-químicas tales como: color, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica, DQO, DBO y dureza. En cuanto a los parámetros químicos se contó con determinaciones de aniones y cationes principales y de algunos elementos traza (CN<sup>-</sup>, As, Cr, Pb y Hg).

### **3.6.1 Clasificación hidroquímica del agua**

Un aspecto importante en el presente estudio fue la compilación, análisis y presentación de los datos de composición y características químicas del agua subterránea del área de estudio. Esta tarea permitió agrupar muestras de agua con características comunes inherentes a su composición, e identificar posibles afectaciones externas (relleno de Navarro).

Para la representación gráfica y clasificación de la información hidroquímica se utilizaron diagramas triangulares: “*Diagramas de Piper-Hill-Langelier*” los que fueron realizados empleando la aplicación “*EASY QUIM 4.0*” (Vázquez Suñé, 1999). En función de la

cantidad y calidad de la serie depurada de datos se seleccionaron diferentes períodos de muestreo. Estos períodos corresponden a: Septiembre-2000 (7 muestras), Febrero-2004 (16 muestras), Enero-2005 (16 muestras), Julio-2005 (15 muestras), Enero-2006 (13 muestras) y Abril-2007 (10 muestras).

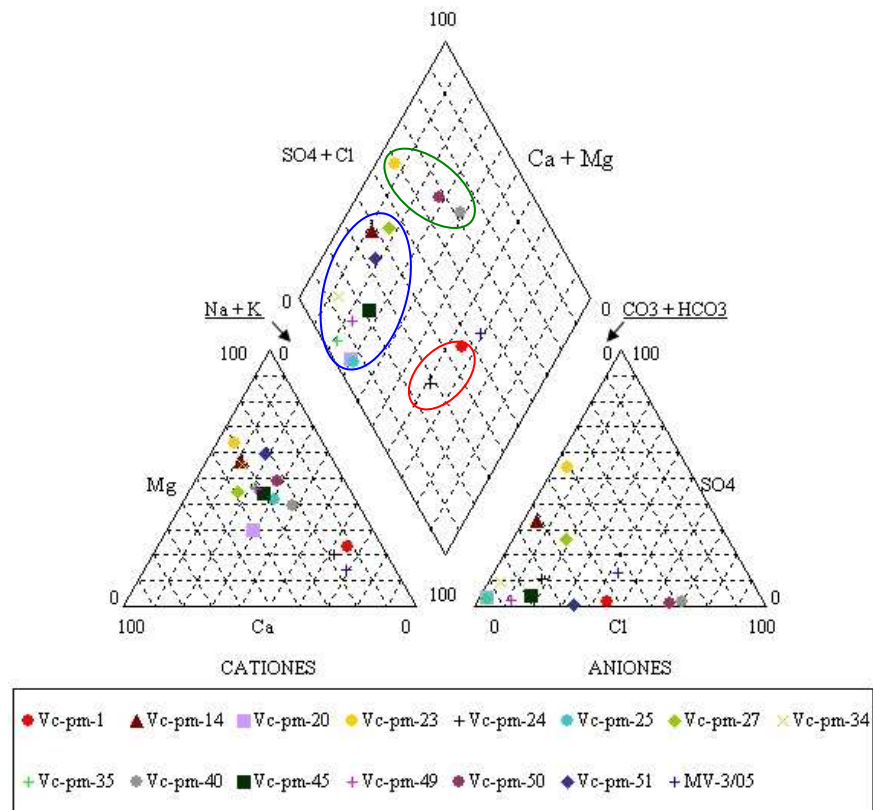
La Figura 3.13(a) presenta la clasificación de las muestras obtenidas en Julio del 2005 (período de bajas precipitaciones). La composición catiónica del conjunto indica aguas de tipo magnésico y sódico. Por su parte, la composición aniónica presenta un predominio de aguas de tipo bicarbonatado. En el diamante central, el conjunto se puede agrupar en tres categorías:

- a. la primera de ellas –que encierra a las muestras en un óvalo azul- corresponde a aguas de tipo “bicarbonatadas magnésicas”,
- b. la segunda, agrupadas por una línea roja, hace referencia a aguas de tipo “bicarbonatadas sódicas”,
- c. finalmente, el tercer grupo, acotado por la curva cerrada verde, representa a aguas de tipo “cloruradas magnésicas”.

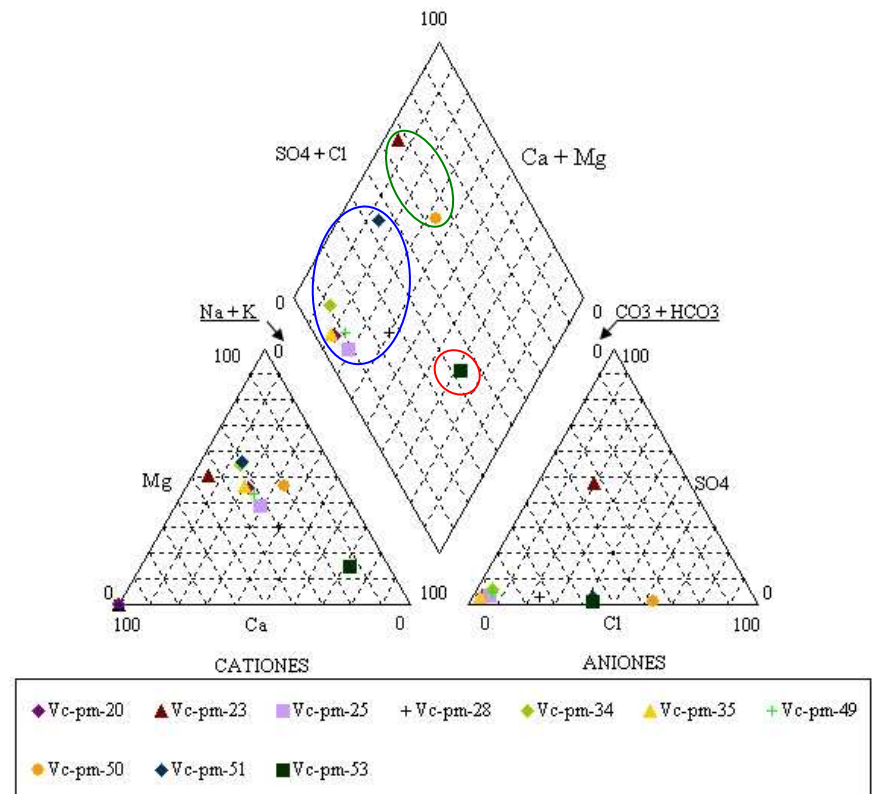
Se destaca la presencia de una muestra de agua de tipo “clorurado sódico” la cual corresponden a un punto de muestreo ubicado en la madre vieja (MV-3/05).

La Figura 3.13(b) presenta la clasificación del tipo de agua para Abril de 2007, muestreo que se corresponde con un período de altas precipitaciones. El agrupamiento producido de los tipos de agua es similar al anterior.

De acuerdo a estudios antecedentes (CVC, 2005) el tipo de agua subterránea que predomina en la zona es “bicarbonatada cálcica-magnésica”. En función de los resultados obtenidos y la ubicación de los pozos de monitoreo, se considera la existencia de una afectación de la calidad del agua subterránea como consecuencia de los lixiviados del relleno en las cercanías de la madre vieja, esta afectación, se manifiesta principalmente, a través de un aumento en las concentraciones de los iones sodio y cloruro.



a) Período seco – Julio 2005



b) Período lluvioso – Abril 2007

**Figura 3.13 Diagramas de Piper – Red de monitoreo Navarro.**

### 3.6.2 Evolución temporal de parámetros físico-químicos

La evolución temporal de los parámetros físico-químicos permite evidenciar el comportamiento, en función del tiempo, de las concentraciones de una determinada especie iónica o parámetro. Si se tiene en cuenta que una actividad antrópica, como lo es un relleno sanitario, genera lixiviados que pueden alterar la concentración de alguno de ellos, al analizar su evolución es posible evidenciar el impacto de los mismos sobre el sistema de aguas subterráneas.

Si bien en la ciudad de Cali, la operación del relleno sanitario se inició a fines de la década de 1960, los primeros resultados acerca de la calidad del agua subterránea se obtuvieron a partir de 1997, año en el cual se inicia la instalación de los pozos de monitoreo. La periodicidad de los muestreos que lleva a cabo la CVC se limita a dos veces por año.

Para analizar la evolución temporal de los parámetros físico-químicos se revisó la información correspondiente a los pozos de monitoreo del sector pertenecientes a la CVC, seleccionándose aquellos con la mayor longitud de registros (pozos Vc-pm 14, 20, 25, 28, 32 y 40). Los parámetros y especies iónicas analizadas fueron los siguientes: conductividad eléctrica (*CE*), Sólidos disueltos totales (*TSD*), bicarbonatos, cloruros, sulfatos y magnesio.

La Figura 3.14(a) muestra la evolución temporal de la *CE* en los pozos mencionados. En ella se observa que gran parte de los mismos presenta un valor medio de 375  $\mu\text{S}/\text{cm}$  el que, de acuerdo a la CVC (2005) es característico del agua subterránea de la zona. Los mayores valores se presentan en los pozos Vc-pm-28 (con un valor medio de 651  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y Vc-pm-40 (1365  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Este último valor se encuentra por encima del límite máximo que fija el Decreto 1575<sup>1</sup> para la conductividad eléctrica (*CE*) que es de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos dos pozos son los que se encuentran más cercanos al antiguo relleno y a la madreveja (paleocauce) y, posiblemente, pueden estar afectados por los lixiviados provenientes del relleno.

La Figura 3.14(b) indica la evolución de los sólidos disueltos totales (*TSD*), para los cuales, el Decreto 1575 establece un valor máximo de 700 mg/l. En la figura se puede apreciar que la mayoría de los pozos evaluados presenta valores inferiores al rango máximo establecido. Sin embargo, al relacionar los valores de *TSD* con la ubicación y

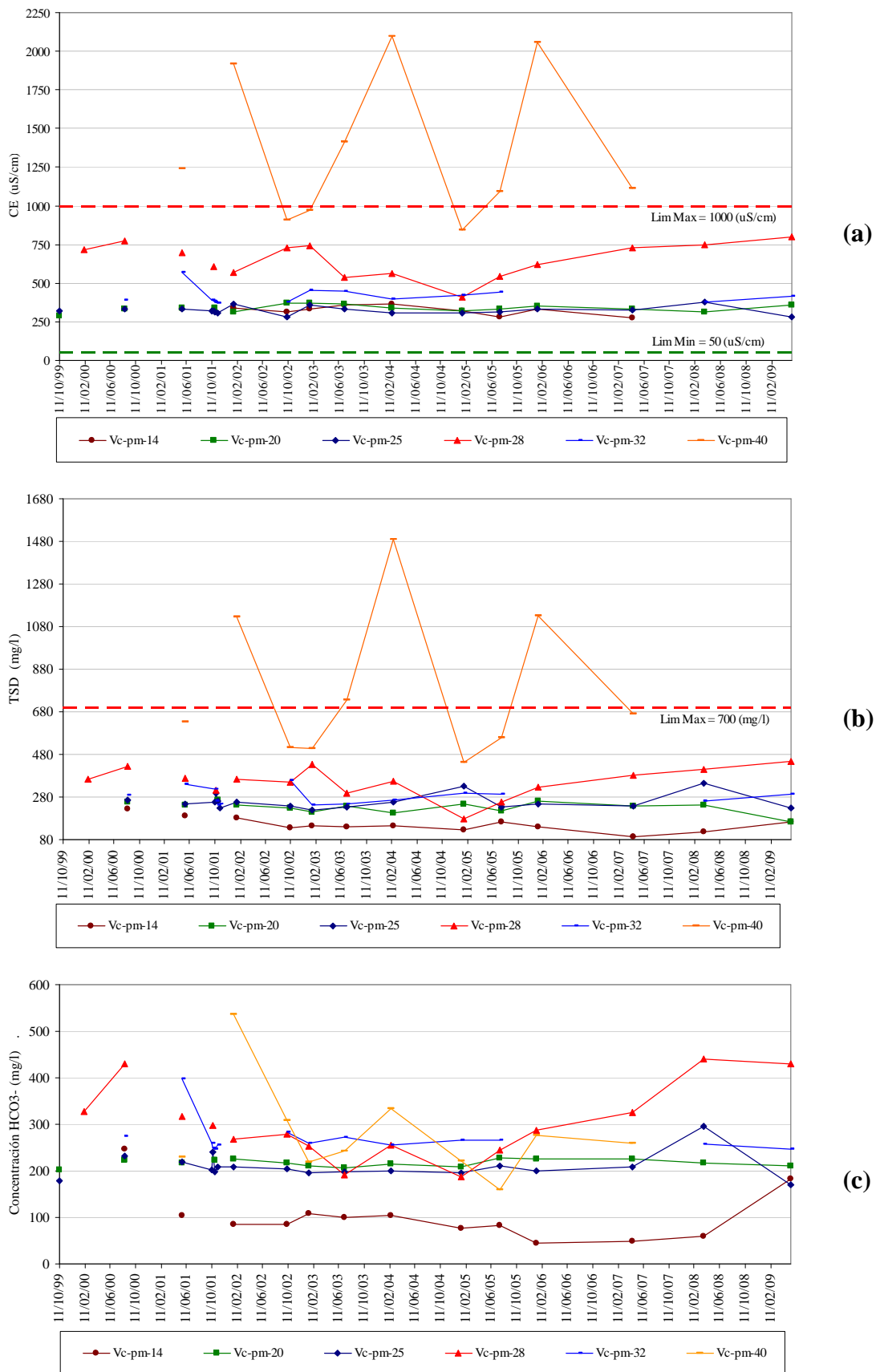
---

<sup>1</sup> Decreto 1575, del Ministerio de Protección Social y Medio Ambiente de Colombia, del año 2007. Fija los límites de calidad del agua para consumo humano.



profundidad de los pozos se puede apreciar que las muestras cuyos valores medios son iguales o inferiores a 250 mg/l, posiblemente no presenten alteración causada por los lixiviados provenientes del antiguo relleno. En el caso de los pozos cercanos al relleno se observan valores de *TSD* superiores a 380 mg/l, siendo el pozo Vc-pm- 40 el que en algunos muestreos ha superado el máximo establecido por el decreto. En dicho pozo, el valor medio de *TSD* es de 780 mg/l.

En el caso de bicarbonato, el Decreto 1575 no establece limitaciones. Como se indicó anteriormente, el agua subterránea del área presenta un fuerte predominio de este ión. La Figura 3.14(c) presenta la evolución temporal de la concentración de bicarbonato. La mayoría de las muestras, incluyendo las obtenidas en los pozos más cercanos al relleno antiguo, presentan valores medios de alrededor de 250 mg/l. Las muestras de agua del pozo Vc-pm-14 constituirían la excepción, presentando un valor medio de 100 mg/l. Este pozo es el que se encuentra más alejado de la madre vieja.



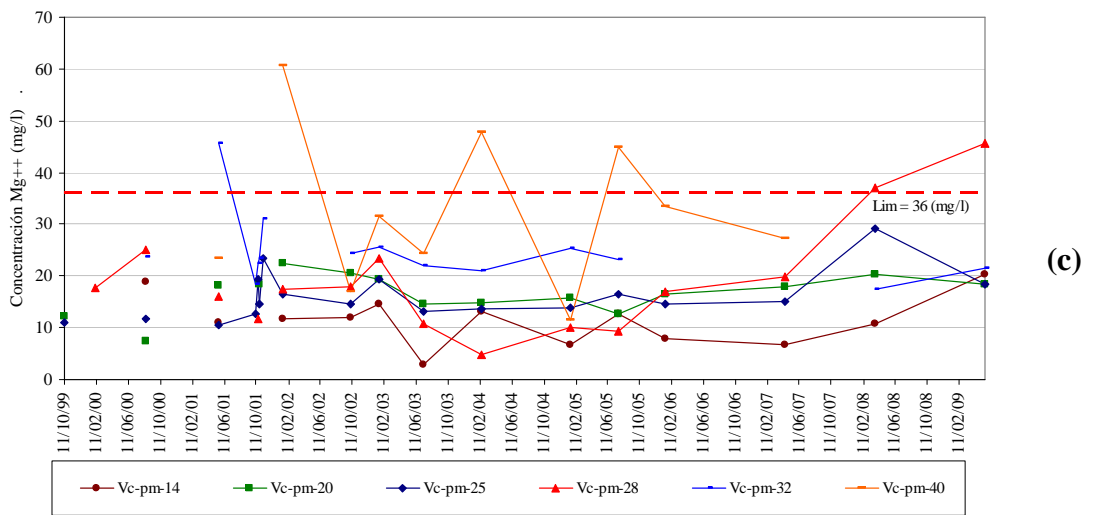
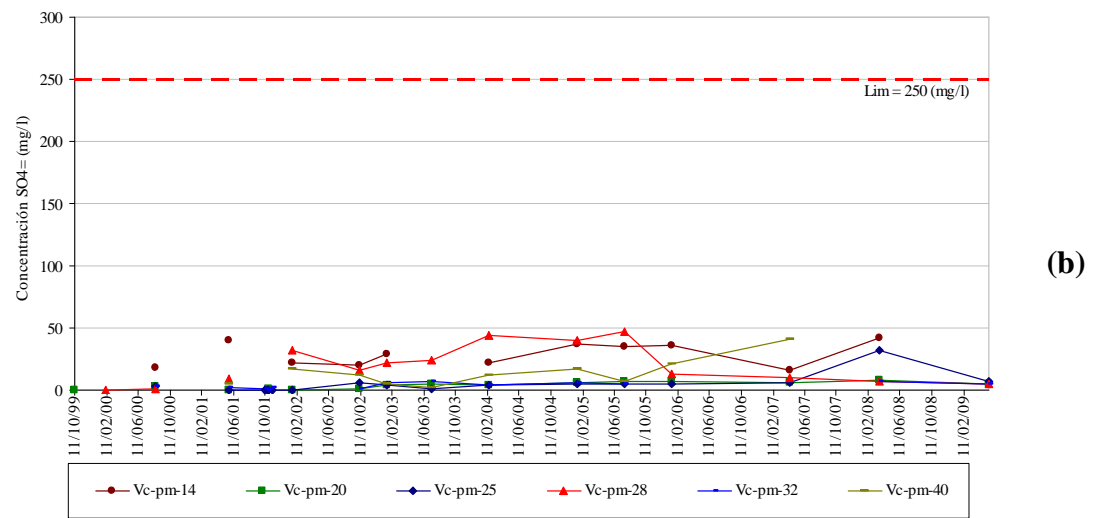
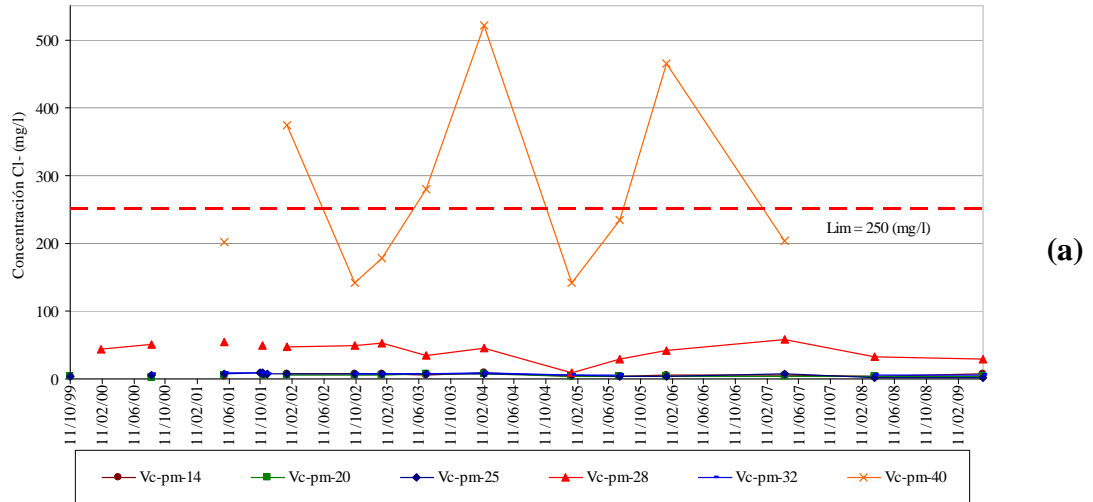
**Figura 3.14** Evolución temporal de parámetros físico-químicos (a) Conductividad eléctrica (CE) (b) Sólidos disueltos totales (TDS) y (c) Bicarbonatos.

Si se tiene en cuenta que el ión cloruro ( $Cl^-$ ) no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, entonces puede ser considerado como un trazador casi ideal (Mac Farlen *et al.*, 1983; Appelo y Postma, 1993). Por lo tanto la evolución temporal del cloruro, tomado como un ión conservativo, es de suma importancia para el desarrollo del presente estudio. La Figura 3.15(a) muestra las diferentes concentraciones de este ión obtenidas en las muestras analizadas. Los pozos Vc-pm-28 y Vc-pm-40 se destacan como aquellos que presentan las mayores concentraciones y fluctuaciones de cloruro respecto al resto de las muestras de agua del grupo analizado. El pozo Vc-pm-40 presenta las concentraciones más elevadas de este ión, exhibiendo un valor medio de 274 mg/l, y alcanzado un valor máximo de 520 mg/l. Ambos valores sobrepasan el valor máximo establecido en el Decreto 1575, que es de 250 mg/l.

El resto de las muestras presentan concentraciones que no sobrepasan los 10 mg/l, a excepción del pozo Vc-pm-28 que alcanza una concentración media de 42 mg/l. Las fluctuaciones en las concentraciones se presentan, en la mayoría de los casos, luego de períodos lluviosos, lo que se asocia a un lavado del relleno.

En el caso del sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), el rango de este compuesto para muestras de agua subterránea en las inmediaciones de un vertedero de residuos sólidos oscila entre 10 y 1000 mg/l (Freeze y Cherry, 1979). La Figura 3.15(b) muestra la concentración que poseen las muestras en los pozos analizados. Su valor medio es de 12 mg/l, no superando el máximo establecido por el Decreto 1575, de 250 mg/l. Cabe destacar que la concentración de sulfatos en los pozos que se encuentran más alejados es de alrededor de 5 mg/l. Sin embargo, en pozos como el Vc-pm-14 y Vc-pm-28 se registraron concentraciones medias de 29 y 19 mg/l, respectivamente. Este resultado evidencia la influencia del relleno sobre las aguas subterráneas del sector, ya que el contenido de sulfatos en el fondo natural se ve sobre excedido hasta en un 300%.

La Figura 3.15(c) muestra la evolución del ión magnesio ( $Mg^{2+}$ ). Si bien el Decreto de Calidad de Agua establece una concentración máxima para el magnesio de 36 mg/l, su valor promedio para las muestras de agua analizadas se encuentra alrededor de 18 mg/l. El pozo Vc-pm-40 es el que presenta, en algunos muestreos, los valores más elevados, con un valor medio de 32 mg/l.



**Figura 3.15 Evolución temporal de parámetros físico-químicos (a) Cloruros, (b) Sulfatos y (c) Magnesio.**

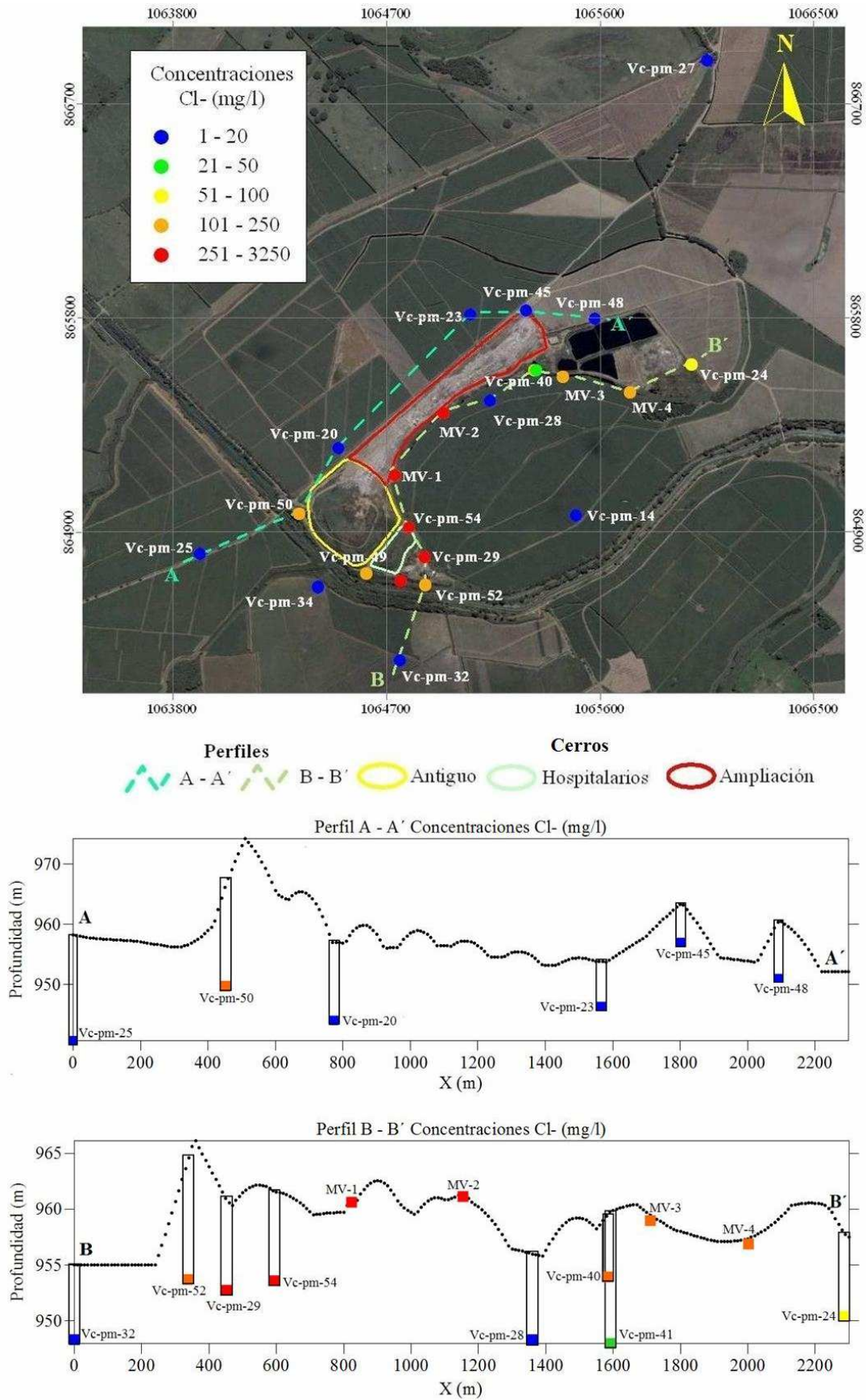
### **3.6.3 Introducción a la identificación de mecanismos y propagación de la contaminación**

Los mecanismos por los que un agente contaminante puede alcanzar un acuífero y propagarse en él, afectando zonas que en principio podrían considerarse alejadas de su influencia son múltiples y a veces muy complejos. Los criterios para la clasificación de estos mecanismos son igualmente complejos y pueden extenderse casi infinitamente. Una clasificación útil es la que considera la posición del punto desde el que se propaga el contaminante. De acuerdo a la ubicación de esta fuente, los mecanismos pueden establecerse según tres orígenes: a partir de la superficie, desde la zona no saturada y los que se originan en la zona saturada (Freeze y Cherry, 1979).

En función de los antecedentes e información recopilada en el caso del relleno sanitario de Navarro, se consideró como hipótesis la existencia de dos mecanismos de introducción y propagación de contaminación al subsuelo. El más importante es el que se lleva a cabo en la superficie del terreno sobre la que se apoyan los diferentes cerros. Los de mayor impacto corresponden a los cerros “Antiguo” y “Hospitalario” pues, como ya se mencionó, estos cerros no presentan una capa impermeabilizante en su base. Por otro lado, el cerro denominado “Ampliación”, si bien ha sido construido siguiendo las especificaciones técnicas correspondientes, presenta una gran superficie ocupada y produce un gran volumen de lixiviados; por lo que requiere especial atención.

La segunda hipótesis para definir el origen del mecanismo de contaminación que podría presentarse es el que ocurriría desde la zona no saturada; específicamente en las lagunas de lixiviados. Estas lagunas almacenan los lixiviados producidos, principalmente, del drenaje interno del cerro “Ampliación” y de las zanjas perimetrales construidas alrededor de todo el relleno antiguo para recolectar los lixiviados en la base de los diferentes cerros.

Para corroborar estas hipótesis, se utilizaron los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua extraídas de los pozos de monitoreo, durante el censo llevado a cabo en diciembre del 2005. En particular, las concentraciones de cloruros (*Cl*) y tenores de conductividad eléctrica (*CE*), por ser los parámetros físico-químicos que mostraron el mayor contraste entre la existencia de altas concentraciones y la cercanía a la posible fuente de contaminación. La Figura 3.16 y la Figura 3.17 muestran la distribución espacial y en profundidad de las concentraciones de ambos elementos, respectivamente.



**Figura 3.16 Distribución y perfiles de concentraciones de Cloruros (Cl) Período Diciembre - 2005**

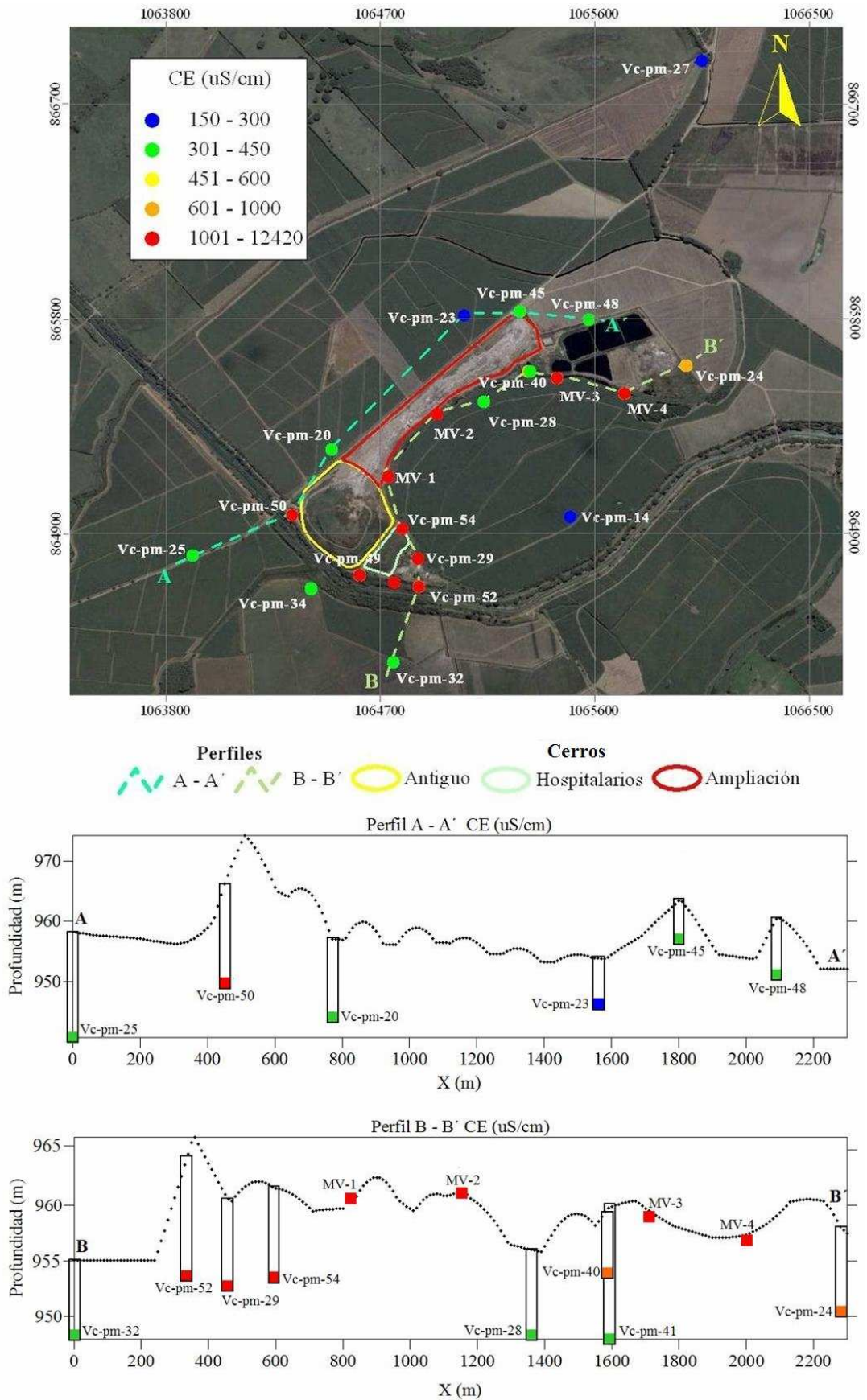
En la Figura 3.16 se puede notar que los pozos que se encuentran en la cercanía de los cerros “Antiguo” y “Hospitalario”, específicamente sobre su zona perimetral, presentan las mayores concentraciones de cloruros, las que oscilan entre 250 mg/l y 3250 mg/l. Estos tenores se presentan en las muestras tomadas en el paleocauce (madrevieja) ubicado al *Este* del relleno, y que, posiblemente, es el receptor de los lixiviados producidos por escurrimiento superficial y/o infiltración desde los cerros mencionados. Por otro lado se observa que las concentraciones más bajas, las que se encuentran alrededor de 20 mg/l, se presentan en los pozos más alejados del relleno de Navarro.

Por su parte los perfiles de concentraciones de cloruro, muestran para el perfil A-A' que los pozos ubicados sobre el sector *Nor-Oeste* del relleno no presentan elevadas concentraciones de (*Cl*), a excepción del pozo Vc-pm-50, próximo al cerro “Antiguo”.

El perfil de concentraciones B-B' se encuentra ubicado en el sector *Sur-este* del relleno y está conformado por una serie de pozos cercanos a los cerros “Hospitalarios” y “Antiguo”, al paleocauce (madrevieja) y al sector de lagunas de lixiviados. Como se observa en el perfil, las mayores concentraciones se presentan hacia el área de influencia de los cerros, a una profundidad promedio de 10 m; aunque también a nivel superficial, en las muestras tomadas en la madreveja y en el pozo Vc-pm-40, cuya profundidad es de 5 m. En el caso de los pozos Vc-pm-28 (que se encuentra vecino a la madreveja) y Vc-pm-41 (que se encuentra entre el cerro de “Ampliación” y la madreveja) las concentraciones de *Cl* son bajas, debido a su profundidad.

La Figura 3.17 muestra la distribución y los perfiles de conductividad eléctrica (*CE*) en los pozos del sector. En primera instancia se puede notar que los pozos que se encuentran alejados del conjunto de cerros presentan los valores más bajos (entre 150 y 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); mientras que los pozos que se encuentran en la zona perimetral del relleno y la madreveja, presentan los mayores valores de *CE* los que varían entre 1000 y 12420  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .





**Figura 3.17** Distribución y perfiles de conductividad eléctrica (CE) Período Diciembre - 2005

Al igual que para  $Cl$ , en el perfil A-A' el único pozo que presenta una elevada  $CE$  es el Vc-pm-50, indicando nuevamente la posible influencia del cerro "Antiguo" como fuente de contaminación potencial.

En el perfil B-B', los valores de  $CE$  en profundidad indican igualmente que los mayores valores se presentan cerca de los cerros "Antiguo" y "de Hospitalarios" así como de la madre vieja. Nuevamente se puede apreciar que los pozos Vc-pm-28 y Vc-pm-41 no presentan elevados valores a pesar de su ubicación. Sin embargo se resalta que el Vc-pm-40 indica valores elevados de  $CE$  debido a que alcanza una profundidad de sólo 5 m.

## **Capítulo 4: Modelo conceptual de funcionamiento**

### **4.1 Metodología Propuesta**

En función de los objetivos propuestos en el presente estudio -que conllevan a la caracterización hidrogeológica del medio físico y a la evaluación del impacto producido en el sistema acuífero, por los lixiviados generados en el antiguo relleno sanitario- se debe completar una serie de etapas metodológicas. Una de estas etapas es el desarrollo de un modelo conceptual que permita definir el funcionamiento hidrodinámico del mismo. Para representar matemáticamente este modelo se asumirán una serie de simplificaciones que permitirán, posteriormente, la aplicación de un modelo numérico que simulará el flujo de agua subterránea y el transporte de un soluto conservativo disuelto en ella.

Por lo tanto, una vez culminado el análisis y el procesamiento de la información antecedente se procedió a la conceptualización hidrogeológica del área de estudio. Para ello se elaboraron, de manera complementaria, dos perfiles lito-estratigráficos que se adicionaron a los ya existentes; se estimaron parámetros hidráulicos formacionales; se definieron direcciones de escurrimiento; se calcularon gradientes y velocidades de flujo y se determinó la calidad del estado actual del agua subterránea en el sector circundante al Antiguo Relleno Sanitario de Navarro.

### **4.2 Hidrogeología del área de estudio**

En el contexto local, específicamente en la zona de influencia del antiguo relleno sanitario de Navarro, el ambiente hidrogeológico ha sido estudiado tanto por la CVC como por entidades de índole nacional y municipal con competencia en el área y la temática (CVC, 2001, INGEOMINAS, 2003 y DAPM-CON-05, 2005). Las investigaciones llevadas a cabo por estos organismos han corroborado la existencia de las unidades acuíferas regionales descritas en el Capítulo 2 (Área de estudio: Marco Hidrogeológico Regional) y denominadas Unidad A, Unidad B y Unidad C.

Cabe destacar en este sentido las tareas llevadas a cabo por el Grupo de Aguas Subterráneas de la CVC que, a principios de 1996, realizó un inventario de pozos profundos y aljibes en el área de Navarro, elaborando correlaciones hidroestratigráficas con el objetivo de identificar las diferentes unidades existentes. En ese momento, ya era de preocupación el posible impacto de los lixiviados producidos por el “Basuro de Navarro” sobre las aguas subterráneas del sector suroriental del Municipio de Cali.

De referencia también es el estudio “Respuesta sísmica del subsuelo en el sector de Navarro – Cali”, llevado a cabo por el INGEOMINAS, en el cual se realizó la microzonificación sísmica detallada del sector de Navarro, y cuyo resultado permitió una caracterización geológica, geotécnica y geofísica del subsuelo.

Por otro lado en el “Estudio de Hidrogeología – Área con Régimen Diferido de Navarro (ARDN) DAPM-CON-05-2005”, adelantado por el Departamento Administrativo de Plantación Municipal del Municipio de Santiago de Cali, se describen las perforaciones construidas en el área, y sus correspondientes perfiles litológicos.

A raíz de esas investigaciones se deduce que, en general, la zona de estudio presenta un modelo hidrogeológico local coincidente al establecido a nivel regional, en donde se presentan las tres unidades acuíferas definidas (Unidades A, B y C). Estas unidades han sido identificadas mediante registros estratigráficos de perforaciones y perfilajes geofísicos.

En la zona de Navarro, y sobreyaciendo a las unidades hidrogeológicas que se describen, existe lo que localmente se denomina *Unidad Superficial*. Esta unidad presenta espesores variables entre los 0,3 y 12 m. Se encuentra constituida principalmente por limos arcillosos a arenosos y arcillas blandas. Sus características le confieren la capacidad de diferir el flujo vertical hacia el acuífero inferior (alojado en la parte superior de la Unidad A), dependiendo del espesor de la capa limo-arcillosa. Sin embargo se destaca que, en varios sectores del área de estudio, el espesor de esta capa es prácticamente nulo, lo que hace que el acuífero se comporte hidráulicamente como libre.

La *Unidad A* se ha identificado en el sector de Navarro con espesores locales de entre 28 a 83 m. En algunos de ellos la unidad se encuentra semi-confinada debido a la presencia de la *Unidad Superficial*. Sin embargo aflora en sentido *Nor-este*, hacia los sectores de los

antiguos paleocauces del río Cauca, presentando un comportamiento de acuífero libre (INGEOMINAS, 2003). Litológicamente está constituida por depósitos no consolidados de arenas limosas, gravas y arenas de diferente granulometría, con presencia de algunos lentes limo-arcillosos de poco espesor.

La *Unidad B* se presenta en la zona como un estrato potente impermeable en donde predominan materiales finos limosos, con abundante arcilla orgánica y suelo fósil que correspondió a una etapa de calma y poco dinamismo del sistema de depositación del río Cauca (DAPM-CON-05, 2005). En esta unidad, cuya potencia aproximada es de unos 100 m, también se presentan niveles lenticulares de gravas y arenas. Hidráulicamente actúa como manto confinante, por su carácter predominantemente acuicludo.

La base de la *Unidad B* constituye el techo del acuífero inferior, el que es denominado por la CVC como *Unidad C*. Esta unidad se comporta típicamente como un acuífero confinado, de presión artésiana y flujo surgente (DAPM-CON-05-2005). Está conformada por arenas medias a muy gruesas y gravas finas a medias, de muy buena selección, intercaladas ocasionalmente con lentes de granulometría fina, limo-arcillosos.

La Figura 4.1 muestra la correlación estratigráfica en la dirección sur-norte (corte D-D'), paralela a la margen izquierda del tramo del río (ver Figura 4.2) Cauca que atraviesa la zona de estudio, donde se puede apreciar las unidades anteriormente descriptas.

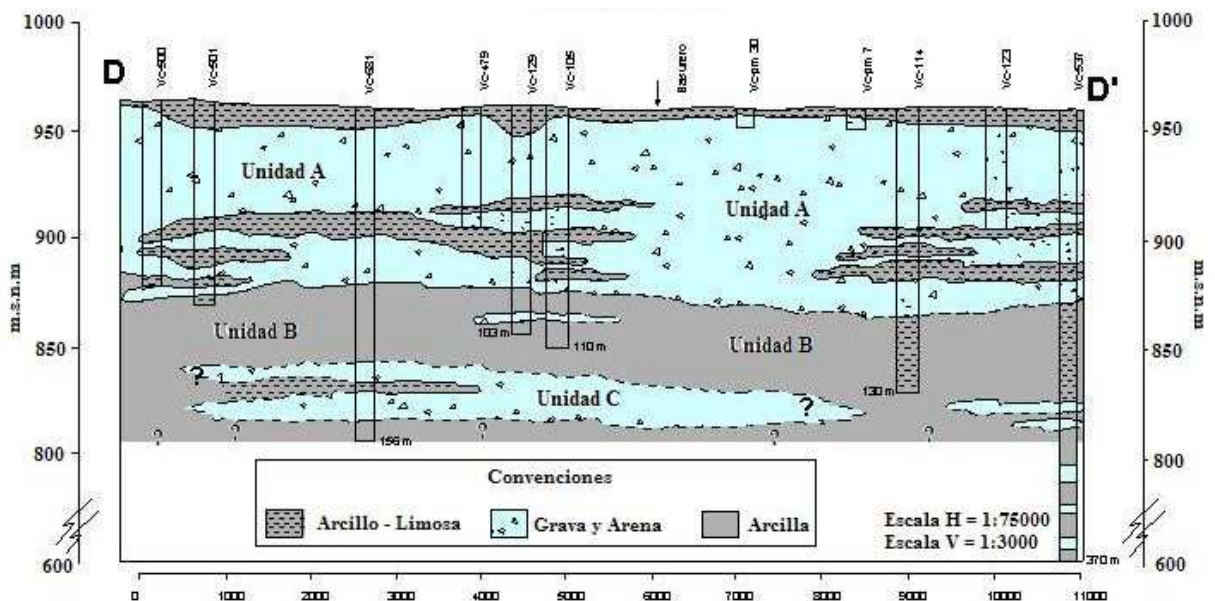
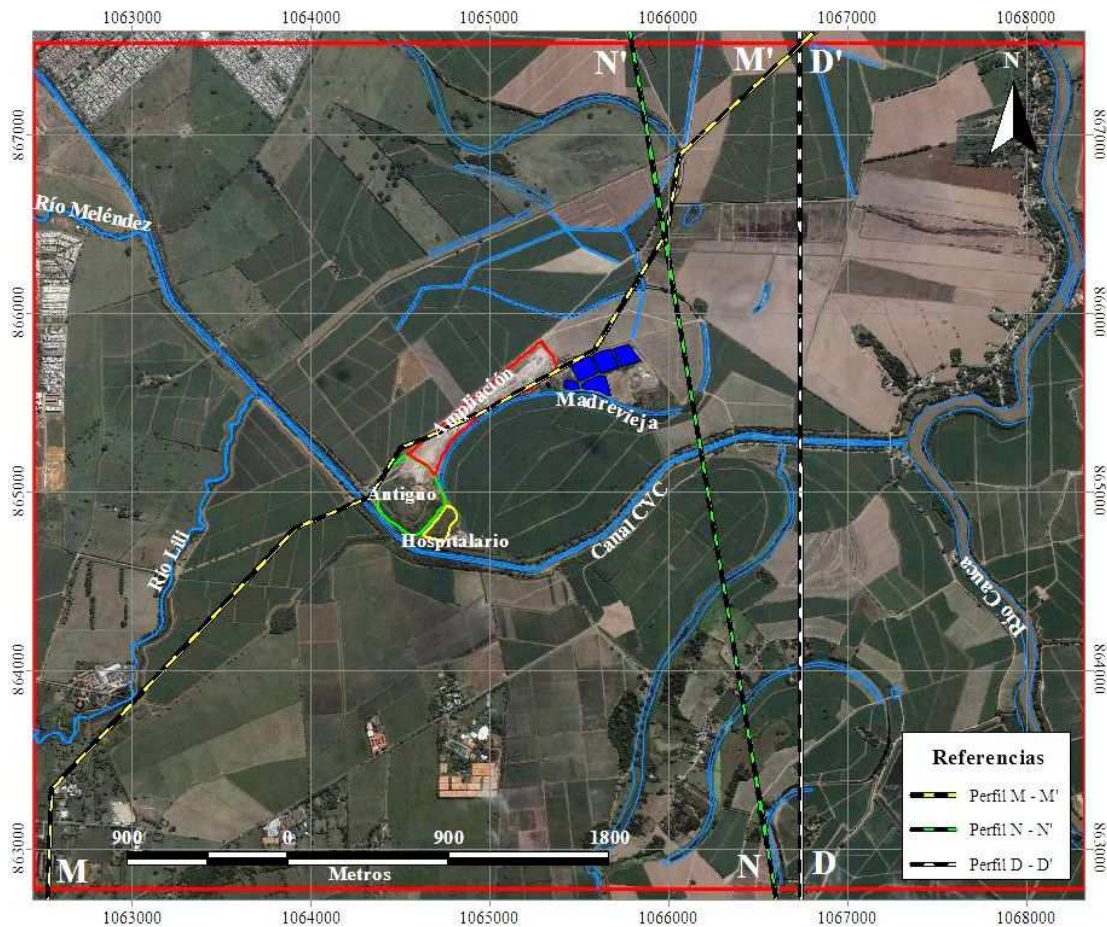


Figura 4.1 Corte estratigráfico – Corte D-D' Dirección Sur – Norte.  
Fuente: CVC (2001)



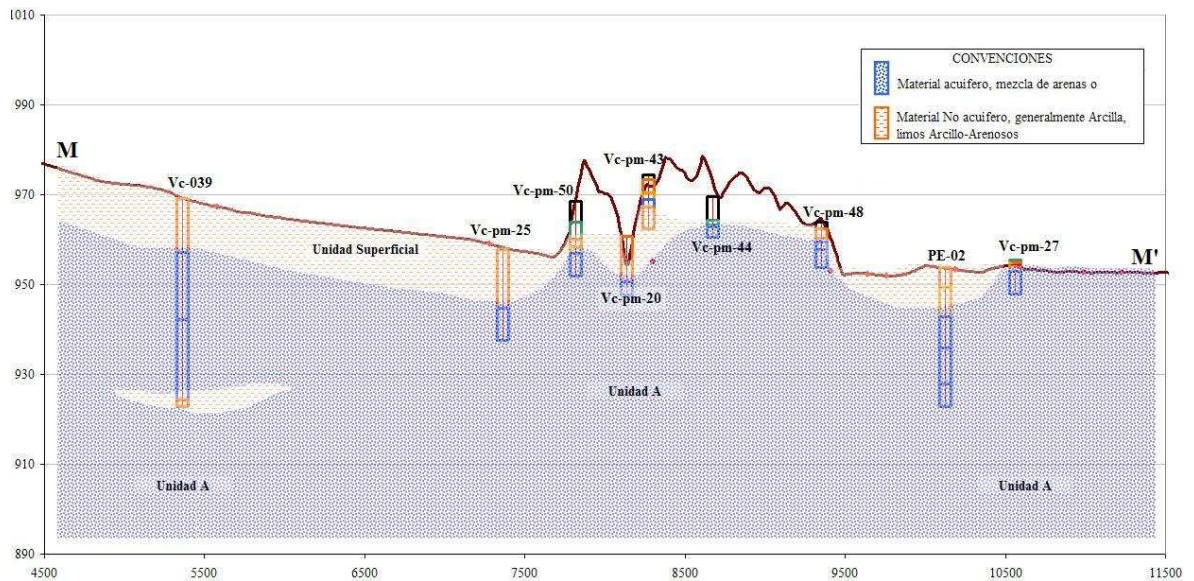
Como se ha mencionado anteriormente, en la zona se pudo confirmar la presencia de las diferentes unidades hidrogeológicas definidas para el valle del río Cauca. Sin embargo, y a los fines de la definición del modelo conceptual es importante establecer los límites en profundidad de cada una de estas unidades. La información lito-estratigráfica disponible, elaborada por INGEOMINAS, describe secciones transversales que se localizan en el sector *Nor-este* del área de estudio y cuya profundidad promedio es de 15 m. Por tal motivo, y para una mejor comprensión del funcionamiento del sistema, se realizaron dos perfiles lito-estratigráficos complementarios los cuales se denominaron M-M' y N-N', cuya ubicación en planta se muestra en la Figura 4.2



**Figura 4.2 Localización de perfiles complementarios.**

El perfil M-M' posee una longitud de 7 Km., su dirección es *SO – NE*, y atraviesa el antiguo relleno sanitario de Navarro. La profundidad máxima que se alcanza en las perforaciones que permiten describir litológicamente este perfil es de 46,5 m, y corresponde al pozo Vc-039. No obstante, la importancia de este perfil radica fundamentalmente en la ubicación de la capa superficial (limo-arcillosa) la cual, como se puede apreciar en la Figura 4.3, presenta espesores variables. Existen sectores en donde esta capa se encuentra retardando el flujo hacia la *Unidad A*, y en otros sectores desaparece

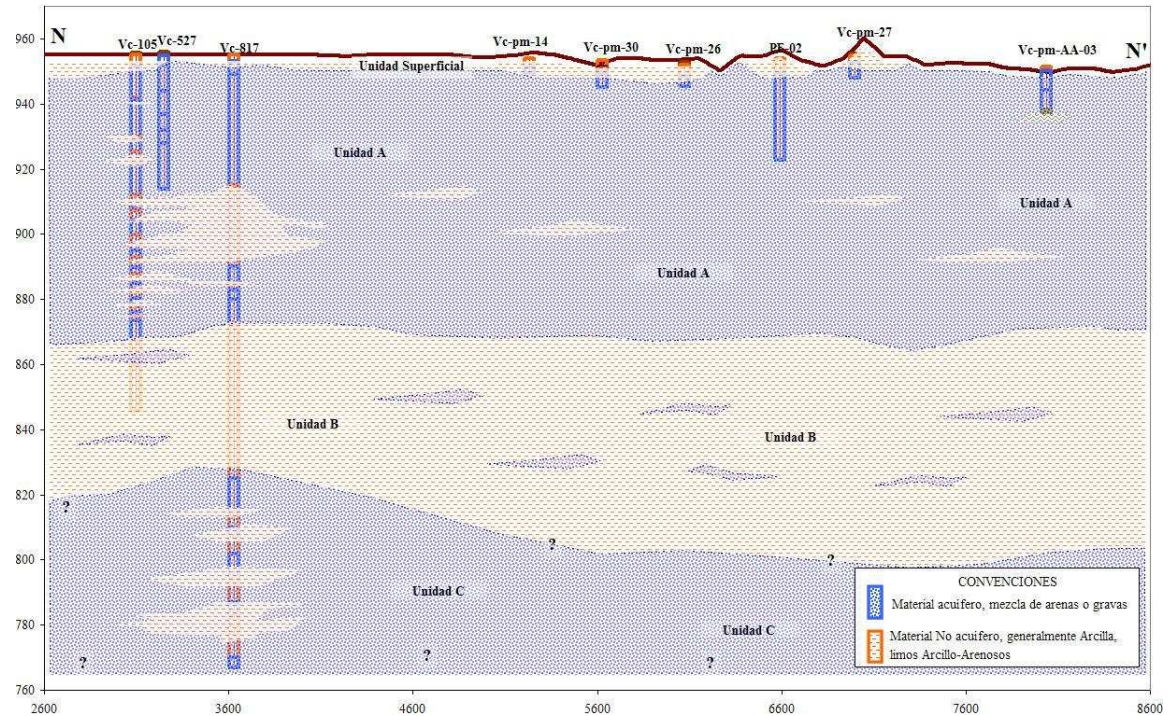
totalmente, otorgándole a la *Unidad A* la característica de acuífero libre. Debido a la profundidad del perfil, para este caso no fue posible identificar el techo de la *Unidad B*.



**Figura 4.3** Perfil complementario M-M' – Dirección SO-NE  
Elaboración propia

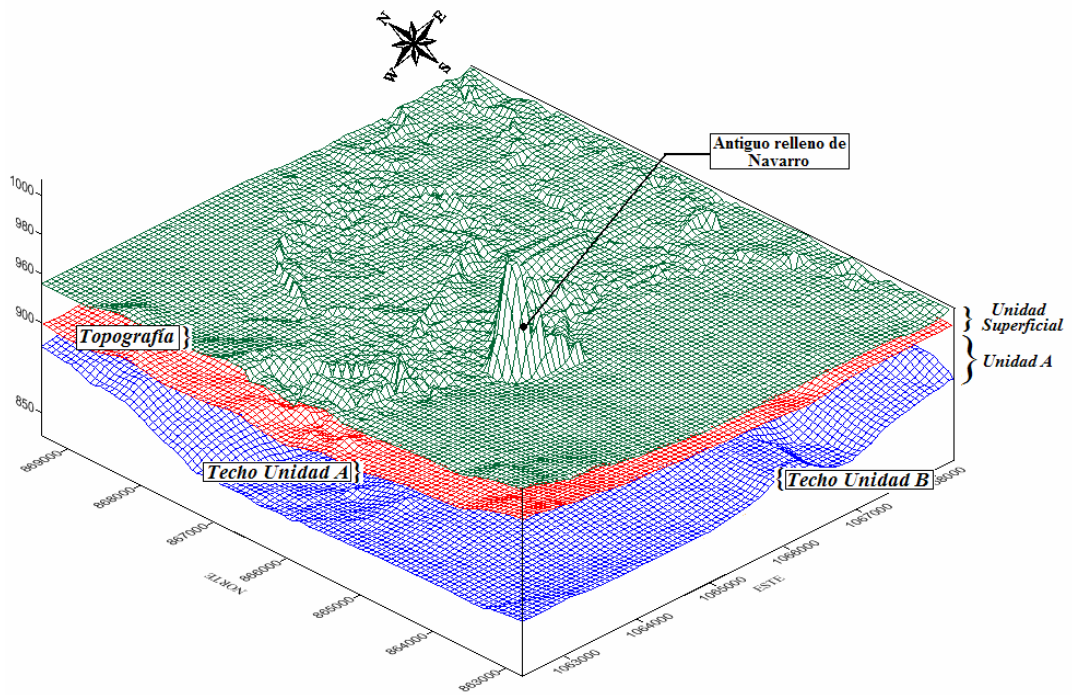
La Figura 4.4 presenta el perfil N-N' cuya longitud es de 6 Km. Su dirección es N-S, paralela al río Cauca (ver Figura 4.2). Para la construcción de este perfil se dispuso de información de columnas litológicas de pozos profundos, siendo el pozo Vc-817 el de mayor profundidad, con 188 m. Al igual que en el caso anterior, en casi todo el perfil se observa la existencia de la *Unidad superficial*, la que se ausenta en los últimos 1000 m. La *Unidad A* se presenta con un espesor promedio de 80 m, con intercalaciones de algunos lentes arcillosos. Dada la información disponible, se pudo inferir de manera aproximada la ubicación del techo de la *Unidad B* (o base de la *Unidad A*) no así su base (o techo de la *Unidad C*).





**Figura 4.4** Perfil complementario N-N' – Dirección N-S  
 Elaboración propia

Dados los objetivos planteados en este estudio, la unidad hidrogeológica denominada *Unidad A*, es la que reviste especial interés. En ella se aloja el acuífero libre, objeto de análisis y evaluación en esta tesis de Maestría. La Figura 4.5 es una representación esquemática de la configuración del techo y la base de las capas consideradas de interés.



**Figura 4.5** Superficies límites y capas a considerar en el modelo conceptual

### 4.3 Parámetros hidráulicos formacionales

La hidráulica subterránea establece los principios generales para estudiar el movimiento del agua en un medio poroso saturado. Este escurrimiento puede caracterizarse cuantitativamente a través de leyes de carácter macroscópico que tratan al medio como un continuo con propiedades bien definidas (Custodio y Llamas, 1996). Estas leyes, consideran a la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento y la porosidad como los parámetros fundamentales que “permiten definir, y en algunos casos predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a unas determinadas acciones exteriores”.

Para estimar el valor de los parámetros hidráulicos formacionales de los acuíferos subyacentes al área de estudio, la CVC ha realizado y evaluado un total de 50 pruebas de bombeo. Los resultados alcanzados en estos ensayos se muestran en la Tabla 4.1. En ella se consignan los valores de los parámetros hidráulicos calculados para los niveles acuíferos superior (*Unidad A*) e inferior (*Unidad C*).

**Tabla 4.1 Parámetros hidráulicos formacionales y características específicas\*\***

Parámetro		Unidad A	Unidad C
Conductividad hidráulica	m/día	5 - 55	20 – 25
Transmisividad	m <sup>2</sup> /día	300 - 2200	1000 – 1500
Coeficiente de almacenamiento		$1 \times 10^{-3} - 1.5 \times 10^{-3}$ <sup>(1)</sup>	$7 \times 10^{-4}$
Porosidad eficaz		0,1 – 0,2 <sup>(2)</sup>	
Factor de goteo	m	240 – 1000 <sup>(3)</sup>	
Capacidad específica	l/s/m	1 – 10	6 – 10

<sup>(1)</sup> Acuíferos semiconfinados y libres

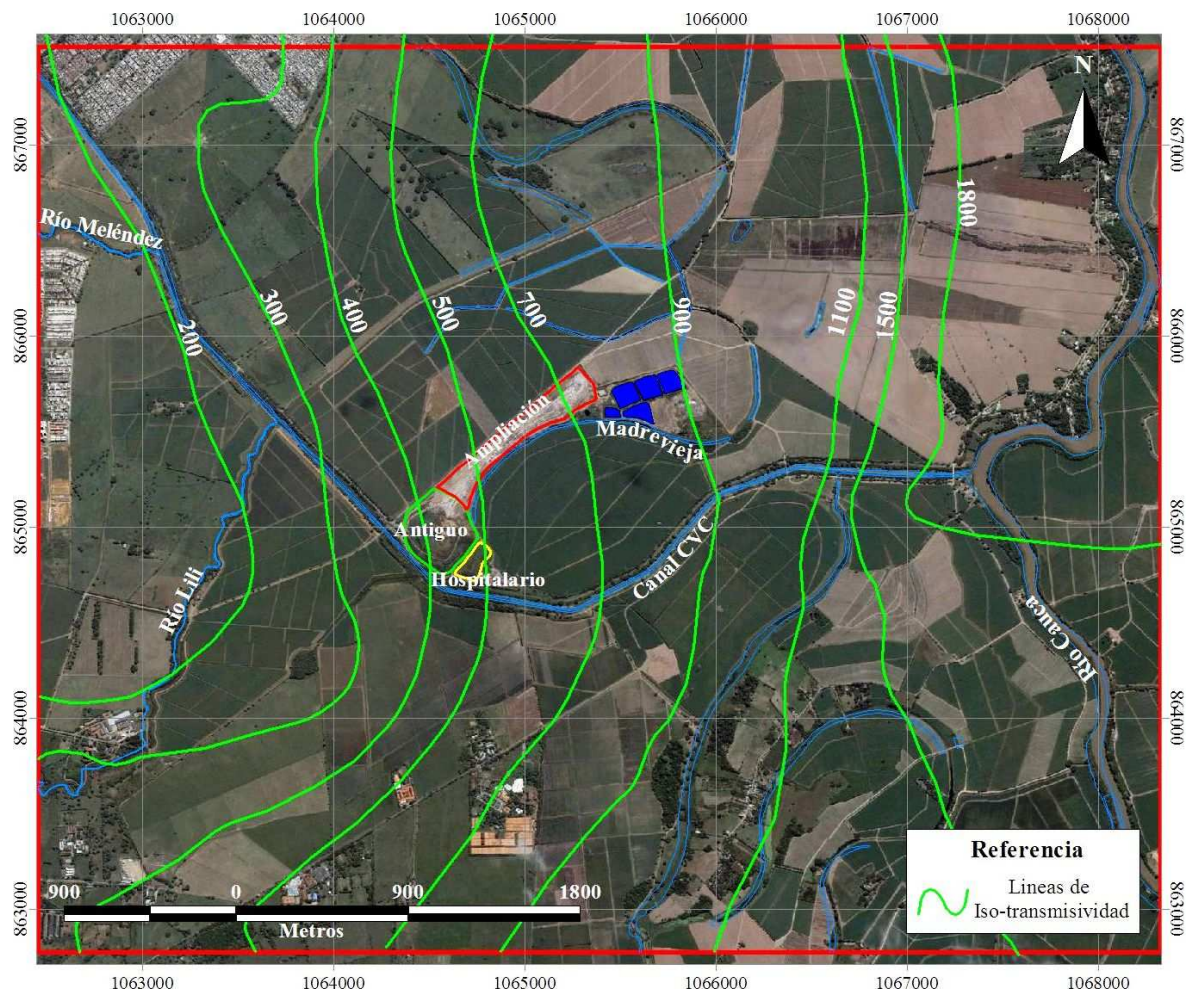
<sup>(2)</sup> Acuíferos libres

<sup>(3)</sup> Acuíferos semiconfinados

\*\* Fuente (CVC, 2009)

En la tabla anterior se puede observar la alta variabilidad de los parámetros hidráulicos, los valores típicos de coeficiente de almacenamiento correspondientes a acuíferos libres y semiconfinados y la excelente capacidad de producción de los pozos alojados en los acuíferos de la llanura aluvial del río Cauca. La Figura 4.6 muestra un mapa de iso-transmisividad de la *Unidad A* del sector de Navarro.





**Figura 4.6** Mapa de líneas de iso-transmisividad ( $m^2/día$ )

Fuente: (DAPM-CON-05, 2005)

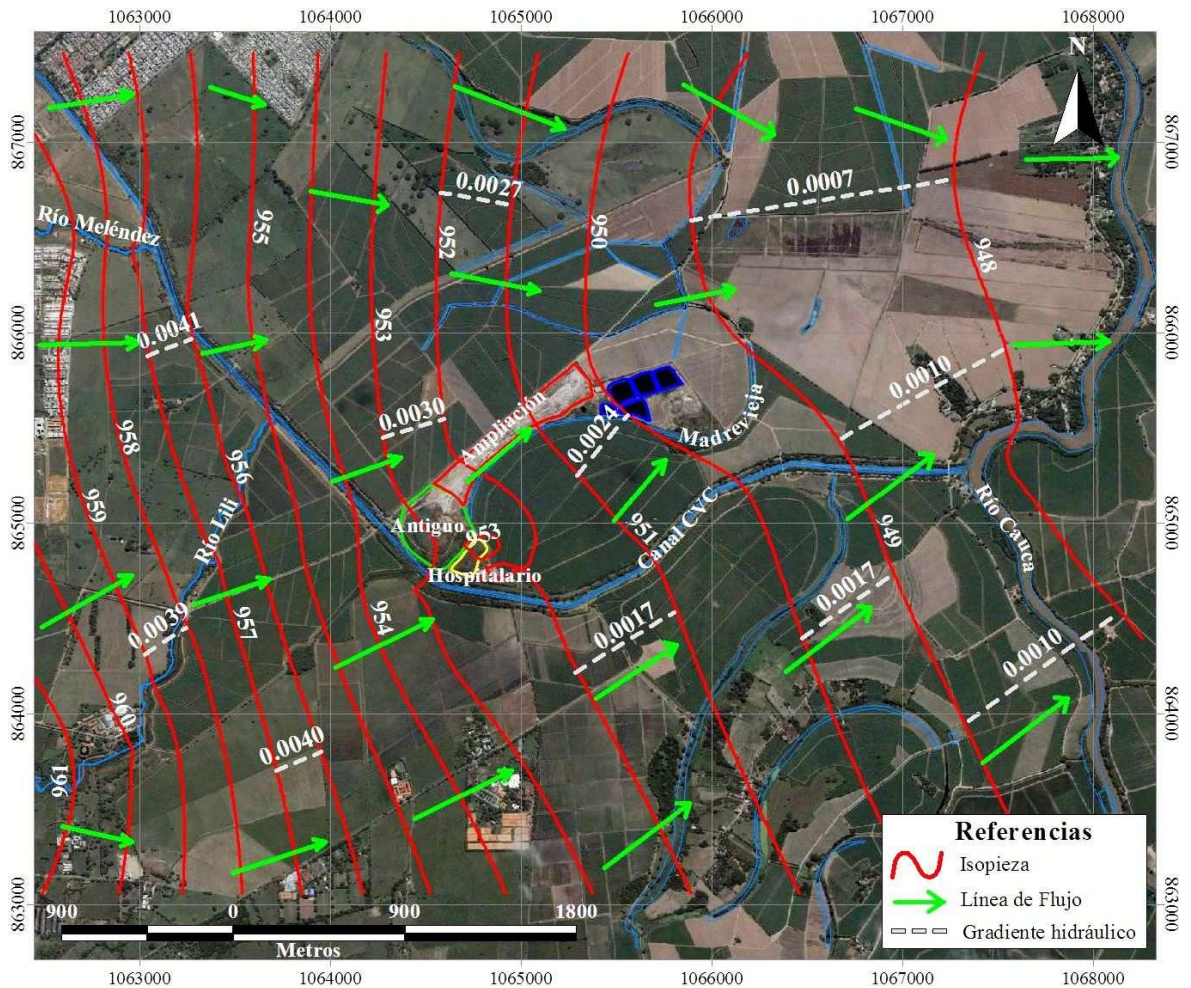
#### 4.4 Dirección del escurrimiento subterráneo

Desde hace más de 25 años, la CVC efectúa registros de medición de niveles estáticos de los pozos en el área de estudio. Generalmente las mediciones se realizan dos veces por año, una en invierno, usualmente en el mes mayo, y otra al finalizar el verano, entre los meses de octubre y noviembre.

En función de estos registros, en la zona de influencia del relleno de Navarro, la dirección general del flujo subterráneo se origina desde la cordillera Occidental hacia los conos aluviales de la llanura, siendo normal al cauce del río Cauca. Ya en las proximidades del río las direcciones de flujo toman una dirección sur-norte, indicando que el río estaría actuando como zona de descarga regional.

El gradiente hidráulico en las partes altas y medias de los conos aluviales es de aproximadamente 6,5 m/km. En los depósitos de la llanura aluvial y proximidades del río Cauca éste toma un valor de 3 m/km (CVC-REGLA-AS, 2009).

La Figura 4.7, presenta la dirección de flujo local en la zona del relleno de Navarro, para la fecha del 21 de febrero de 2004. El gradiente hidráulico en el sector Oeste se encuentra alrededor de los  $4 \times 10^{-3}$  m/m, en las inmediaciones del relleno de Navarro el gradiente hidráulico es aproximadamente de  $2,7 \times 10^{-3}$  m/m y finalmente hacia aguas abajo, en las cercanías del río Cauca el gradiente hidráulico es de  $1 \times 10^{-3}$  m/m. Las velocidades de flujo se encuentran alrededor de los 0,15 m/día a 0,06 m/día.



**Figura 4.7** Mapa de isopiezas, dirección de flujo y gradiente hidráulico (21 del Febrero de 2004)



#### 4.5 Entradas y salidas de agua del sistema

En función del análisis de los antecedentes disponibles y de los resultados del procesamiento realizado, para el área de estudio se han identificado diferentes zonas de entrada y salida de agua subterránea.

La entrada principal al sistema se presenta a través de las zonas de falla de la cordillera occidental y de los conos aluviales de los ríos Lili y Meléndez, tributarios del río Cauca. Este ingreso se materializa a través de la isopieza de 960 m, valor que puede variar en  $\pm 1$ m dependiendo del período climatológico imperante.

Igualmente importante es el aporte generado por el exceso de precipitación, estimado a través de un balance hídrico, y la infiltración profunda de los excedentes del riego utilizado en el cultivo de la caña de azúcar. Ambos aportes constituyen dos componentes importantes para estimar la recarga al acuífero en la zona de estudio. La recarga por precipitación fue estimada mediante un balance hídrico el que arrojó un monto de ingreso de agua al sistema de 260 mm/año. Los excedentes de riego, que se producen en períodos secos (Julio y Agosto) alcanzan los 148 mm/año.

También debe tenerse en cuenta que debido a que el antiguo relleno de Navarro se encuentra sobre un paleocauce del río Cauca, en la zona es habitual encontrar varios cuerpos de agua someros (zanjones o pequeños humedades). En particular, para el presente estudio, es de interés la madreveja que se encuentra junto al antiguo relleno la cual, debido a su cercanía, es receptora directa de los lixiviados por escorrentía o infiltración de los cerros aledaños. La evidencia que se maneja (información hidroquímica, reconocimientos de campo) permiten asumir la hipótesis de que la misma constituye una fuente de entrada directa de flujo y lixiviados al sistema acuífero.

En relación a las salidas de agua del sistema se consideraron tanto las naturales como las artificiales. La CVC ha identificado que la descarga natural (*salida*) del nivel superior del acuífero libre (*Unidad A*) se produce sobre el río Cauca y constituye su flujo base (CVC-REGLA-AS, 2009).

Como salidas artificiales se consideraron las extracciones realizadas a través de los pozos de bombeo. Cabe aclarar que en función de la ubicación relativa de los pozos respecto del

relleno sanitario, estos se encuentran muy alejados excediendo en todos los casos el radio de influencia que, según los antecedentes de la zona, es de 1000 m.

En la Figura 4.8 se presenta, de forma esquemática, el modelo conceptual propuesto para la zona de estudio.

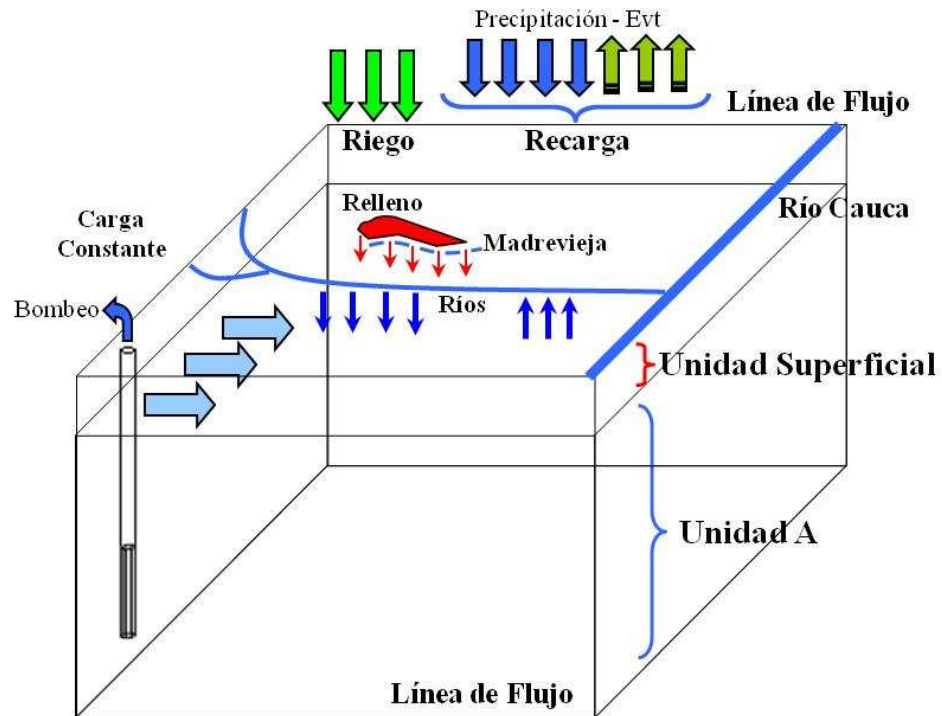


Figura 4.8 Esquema de modelo conceptual propuesto

#### 4.6 Calidad del agua subterránea en la zona de influencia del relleno sanitario

El sector donde se encuentra ubicado el antiguo relleno de Navarro, desde el contexto hidrogeológico, es indiscutiblemente un foco potencial de contaminación del agua subterránea del acuífero local. La principal fuente de contaminación que afectaría al agua subterránea en el sector, serían los lixiviados producidos por la infiltración del agua de lluvia a través de residuos sólidos contenidos en este antiguo relleno sanitario.

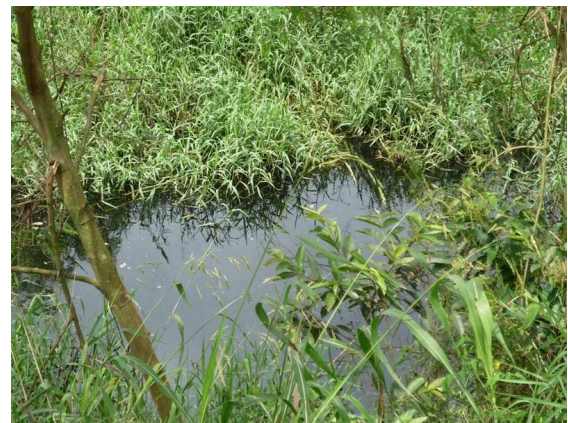
Otro aspecto que contribuye al deterioro de la calidad del agua subterránea sería la mala planificación y manejo técnico de algunos de los cerros, con una inadecuada impermeabilización en su base, lo que habría permitido la percolación directa de los lixiviados hacia el acuífero. Por otro lado, la poca eficacia en el manejo tanto de los lixiviados producidos por escurrimiento como las deficiencias en el sistema de drenaje, han originado la acumulación de dichos líquidos en canales perimetrales y en el paleocauce o

madrevieja del río Cauca, el que posee una conexión hidráulica directa con la *Unidad A* (acuífero libre).

En una visita realizada el 28 de febrero de 2011, por parte de funcionarios de la CVC, a las instalaciones del antiguo relleno, se pudo registrar fotográficamente (Figura 4.9) los diferentes derrames que se presentan en superficie y en el entorno del antiguo relleno de Navarro.



a) acumulación de lixiviados vías internas del antiguo relleno de Navarro



b) Sector del antiguo paleocauce con presencia de lixiviados



c) Canal perimetral al relleno

### Figura 4.9 Focos de contaminación por lixiviados detectados

(Fuente Diario El País Cali – Edición 15/05/2011)

Si bien es cierto que este tipo de evidencias muestra, efectivamente, que en la zona de Navarro se lleva a cabo un proceso constante de contaminación, el análisis de la información hidroquímica (a pesar de no contar con serie continua de muestreos) corrobora que la zona más crítica es el sector que corresponde al antiguo paleócauce o *Madrevieja*, el



cual es receptor directo de los lixiviados –tanto los provenientes de los distintos cerros como de las diferentes lagunas de almacenamiento– mostrando valores elevados de *Cl* y *CE*.

La CVC realizó una caracterización general de los lixiviados producidos por el Relleno Sanitario de Navarro. En la Tabla 4.2 se puede observar el resultado de los diferentes parámetros evaluados.

**Tabla 4.2 Caracterización de lixiviados\*\***

Parámetro	Concentración
pH	8.2 - 8.8
Conductividad	7.300 - 13.000 S/cm
DQO	2.000 - 10.300 MD/L
DBO	1.080 MG/L
DBO/DQO	0.35
Alcalinidad Total	2.200 - 7.000 mg/l
Cloruros	1.300 - 3.100 mg/l
Hierro	3 - 8 mg/l
Nitratos	2.6 - 5.8 mg/l - N
Nitrógeno Total	410 - 683 mg/l - N
Nitrógeno	304 - 400 mg/l - N
Amoniacal	106 - 283 mg/l - N
Nitrógeno Orgánico	0.09 - 0.15 mg/l - N
Fenoles	0.262 - 0.370 mg/l - N
Nitritos	0.5 - 0.15 mg/l
Plomo	0.5 - 0.9 mg/l
Cromo	0.5 - 0.85 mg/l
Zinc	0 - 3.4 microgramos/l
Cianuro	2.4 x10 <sup>3</sup> - 2.4 x10 <sup>8</sup>
Coliformes Fecales	NMP/l
Cadmio	0.017 mg/l

\*\* Fuente: CVC (2001)

Todos estos parámetros, a excepción de nitrato, cianuro y zinc, presentan concentraciones muy superiores a las normas de potabilidad establecidas por el Ministerio de la protección social de Colombia (Decreto 1575, del 2007). De aquí se deduce el alto poder de contaminación de este lixiviado, razón por la cual se debe tratar de evitar la migración de los mismos hacia las aguas superficiales y subterráneas del sector. En su defecto, acotar la propagación de los mismos, estrategia que deberá considerar factibilidad técnica y económica.

De acuerdo a Azcuntar (2000) el sistema de flujo subterráneo en la zona del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro es muy lento, con una velocidad promedio del agua subterránea de 1 a 4 cm/día. Según este autor, este hecho no ha permitido que la pluma de

contaminación haya avanzado mucho lateralmente, pero si que haya facilitado su profundización. La hipótesis planteada por Azcuntar tratará de ser comprobada en este trabajo de Tesis.

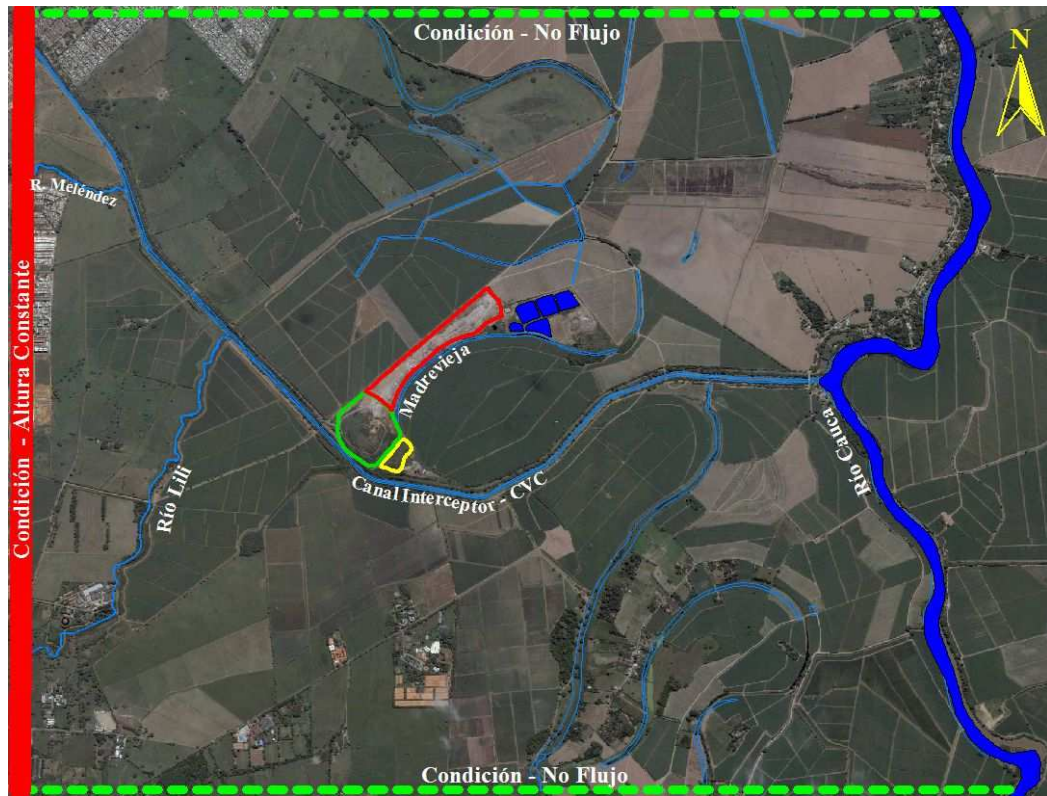
#### **4.7 Dominio del sistema (Geometría y límites)**

Con el objetivo de la posterior representación matemática del modelo conceptual a través de la implementación de un modelo numérico de flujo y transporte, se definió el dominio del área de estudio. Tres aspectos se consideraron relevantes. El primero de ellos fue considerar una superficie que abarque la totalidad de la zona de interés. Para ello se seleccionó un área de 5,8 Km de ancho (dirección *O-E*) por 4,7 Km de longitud (dirección *S-N*), la que comprende a los elementos más relevantes: antiguo relleno de Navarro, pozos de monitoreo con información de nivel estático y calidad de agua; antiguo paleocauce del río Cauca (con una longitud aproximada de 2 Km) y principales cuerpos superficiales de agua mencionados anteriormente.

El segundo aspecto considerado es que dicho dominio fuese lo suficientemente extenso como para que las condiciones de borde no restringieran la posterior representación matemática del sistema. Por ello se juzgó conveniente ubicar en la zona central del dominio al foco de interés (antiguo relleno de Navarro).

El tercer aspecto tuvo en cuenta el aprovechar las condiciones de borde naturales. Para el caso particular de la zona de estudio fueron las siguientes: como límite *Este*, el río Cauca, que tal como indican los antecedentes funciona como zona de descarga del flujo subterráneo del acuífero de la *Unidad A*. En el *Oeste* se consideró como límite una línea equipotencial (altura de carga constante); tanto al *Norte* como al *Sur*, el límite queda establecido por dos líneas de corriente (condición de flujo nulo o borde impermeable).

En la Figura 4.10 se puede observar la ubicación del dominio del sistema y las diferentes condiciones de borde establecidas en la definición del modelo conceptual.



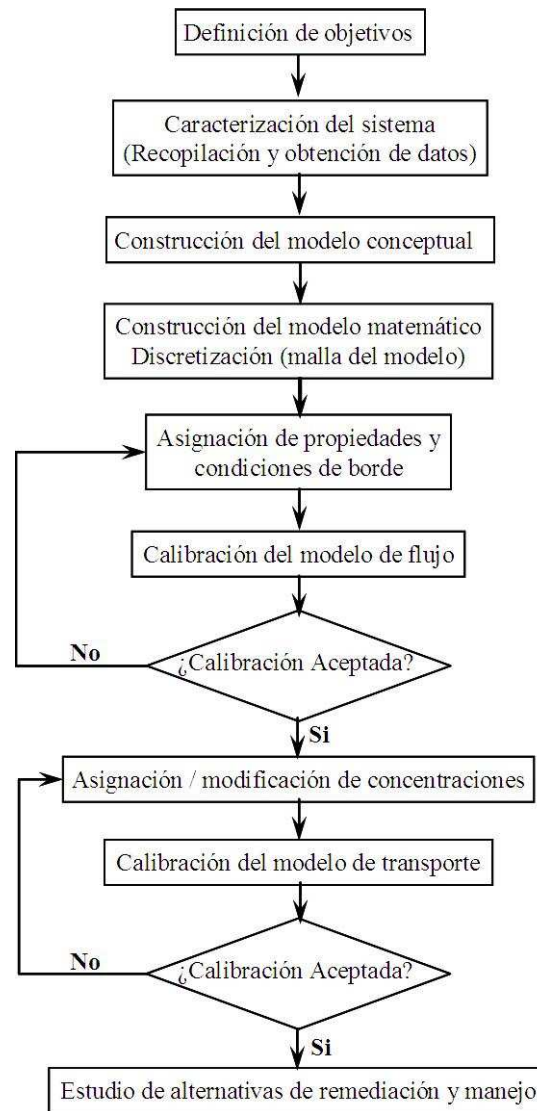
**Figura 4.10** Extensión y límites del dominio del sistema

## Capítulo 5: Implementación del modelo de flujo

### 5.1 Aspectos Generales

El modelo conceptual propuesto, que implica la valoración de las características más relevantes del sistema acuífero para la comprensión de su funcionamiento y de los procesos que tienen lugar en él, facilitó la posterior aproximación cuantitativa. Es a través de este modelo conceptual que se pudo establecer el dominio del sistema a modelar, el número de capas a considerar, sus propiedades, condiciones iniciales y de borde, y sus respectivas entradas y salidas de agua (recargas, drenajes, ríos, etc.). Luego de esta esquematización se procedió a la implementación de un modelo matemático de flujo 3-D, en diferencias finitas, que fue calibrado en régimen permanente y a partir del cual se pudieron simular distintos escenarios.

La Figura 5.1 presenta las diferentes etapas metodológicas propuestas para la elaboración del modelo de flujo y transporte en el presente estudio.



**Figura 5.1 Diagrama de flujo de etapas para la construcción del modelo de flujo y transporte**

### 5.1.1 Visual MODFLOW como herramienta para la simulación del flujo

Para la implementación numérica del modelo conceptual se empleó la aplicación Visual Modflow 4.1, paquete informático que integra las versiones de dominio público de los modelos Modflow, Modpath y MT3D para la simulación de flujo, seguimiento de partículas y transporte de solutos, respectivamente.

*Modflow* es un programa desarrollado por McDonald y Harbaugh (1984) para el United States Geological Survey (USGS) que simula el escurrimiento 3-D en un medio poroso saturado a través del método en diferencias finitas en bloque centrado. El programa está desarrollado en una estructura modular, con un programa principal (*MAIN*) y una serie de subrutinas altamente independientes, las que se agrupan en “paquetes”. Cada uno de los

paquetes aborda una característica específica del sistema hidrogeológico la cual puede ser simulada, (por ejemplo el flujo hacia drenes, o el aporte de un río al acuífero o viceversa), y utilizar diferentes métodos de solución para resolver las ecuaciones de flujo. La división del programa en paquetes, le permite al usuario examinar las características de interés y le brinda la posibilidad de desarrollar capacidades adicionales, sin modificar las ya existentes (Pérez, 2009).

Modflow, entonces, resuelve la ecuación diferencial que rige el flujo en medios porosos saturados, utilizando el método de diferencias finitas, a través de un número discreto y finito de puntos en el espacio (celdas) y tiempo (períodos), dando origen a un sistema de ecuaciones lineales, cuya solución entrega un valor de nivel piezométrico en cada celda y en cada período simulado. El sistema se resuelve mediante iteraciones sucesivas hasta que el valor del nivel piezométrico satisfaga el criterio de convergencia impuesto.

El escurrimiento 3-D en un medio poroso saturado con agua de densidad constante, puede ser descrito a través de la ecuación diferencial parcial (5-1), la cual describe el movimiento del agua subterránea en condiciones de no equilibrio, en un medio heterogéneo y anisotrópico, considerando que los ejes coordenados están alineados según las direcciones de los ejes principales del tensor de conductividad hidráulica:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5-1)$$

Donde:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ : son los valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes x, y, z, que se asumen paralelos a los ejes principales de la conductividad hidráulica (L/T);

h: es la carga potenciométrica (L);

W: es el flujo volumétrico por unidad de volumen que representa las fuentes o sumideros, si  $W > 0$  el flujo ingresa al sistema, si  $W < 0$  el flujo sale del sistema ( $T^{-1}$ );

$S_s$ : es el almacenamiento específico del medio poroso ( $L^{-1}$ ); y

t: tiempo (T)



## 5.2 Discretización: Diseño de la malla del modelo

Para diseñar los límites físicos del área a modelar se utilizó como mapa base el presentado en la Figura 4.10. El origen del dominio se encuentra en coordenadas Xmin: 1'062.443 e Ymin: 862.782. Una vez definido este dominio se realizó el diseño de la malla, discretizando la zona de estudio tanto en sentido horizontal como vertical.

### 5.2.1 Discretización horizontal

El dominio a modelar quedó definido con las siguientes dimensiones:  $X = 6300$  m e  $Y = 6500$  m. Para la discretización horizontal se construyó una malla con espaciamientos no uniformes, que iban decreciendo hacia la zona central del dominio (sitio de interés). En las proximidades de los bordes Oeste y Este se definieron celdas de  $100 \times 100$  m. A partir de éstas, y hacia el centro del dominio, el espaciamiento se fue refinando de manera telescópica de modo de llegar al sitio de interés (relleno sanitario) con un tamaño de celda de  $10 \times 10$  m. De esta manera el dominio quedó definido por 274 columnas y 222 filas, las que conforman una malla de 60828 celdas (Figura 5.2).

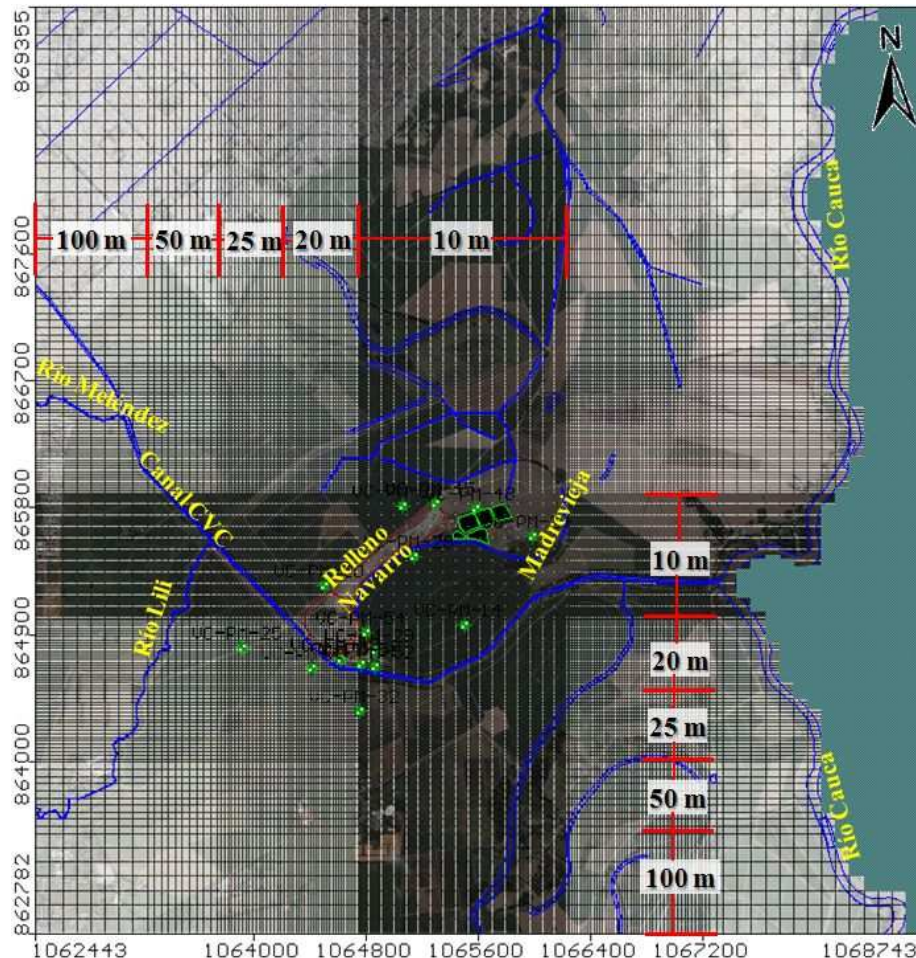


Figura 5.2 Discretización horizontal de la zona de estudio

## 5.2.2 Discretización vertical

El siguiente paso fue la discretización vertical de las capas de interés hidrogeológico definidas en el modelo conceptual. De allí que, para la implementación del modelo matemático se consideraron, en principio, dos capas:

- Capa 1: Representa a la denominada “*Unidad Superficial*”. Su techo está constituido por la topografía del terreno, cuya elevación máxima alcanza los 1008 m.s.n.m. La base de la capa 1 queda definida por el techo de la *Unidad A*.
- Capa 2: Esta capa representa a la denominada *Unidad A*. Su techo queda definido por la base de la “*Unidad Superficial*” y su base se corresponde con el techo de *Unidad B*. La cota mínima que alcanza esta capa es de 837 m.s.n.m.

La estimación del techo y la base de cada capa se realizó a partir de la integración de los datos de registros litológicos de pozos, perfiles lito-estratigráficos y sondeos geofísicos de la zona. Se construyeron de este modo tres diferentes superficies: topografía del terreno, techo de la *Unidad A* y techo de la *Unidad B*. Como técnica de interpolación se empleó el método de Kriging. Estas superficies se importaron al programa Visual Modflow para limitar las dos capas discretizadas. En la Figura 5.3 se observa una sección transversal y una longitudinal del dominio del área a modelar donde se puede apreciar no solo la cota del techo y la base de cada una de las capas definidas sino también el espaciamiento de grilla seleccionado y la asignación de las celdas activas e inactivas.

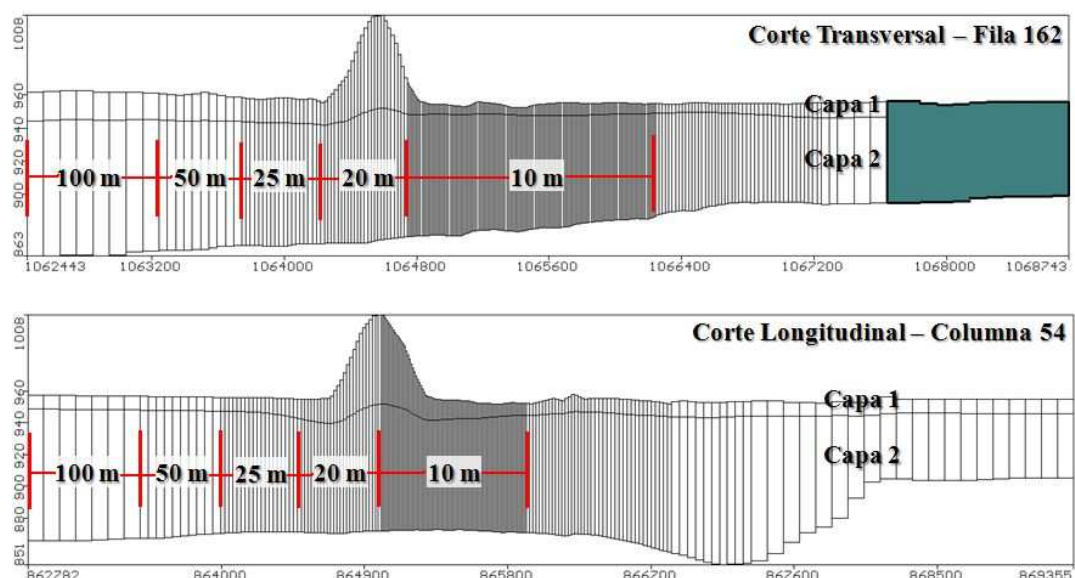


Figura 5.3 Sección transversal y longitudinal de las capas del modelo

### 5.3 Asignación de propiedades del acuífero

Finalizada la etapa de discretización del sistema, y en función de las características e información disponible de la zona de estudio, se asignaron las propiedades hidrogeológicas básicas que permiten cuantificar el flujo. Se incorporaron así los datos de conductividad hidráulica, porosidad total, porosidad efectiva y almacenamiento específico para cada una de las capas del modelo.

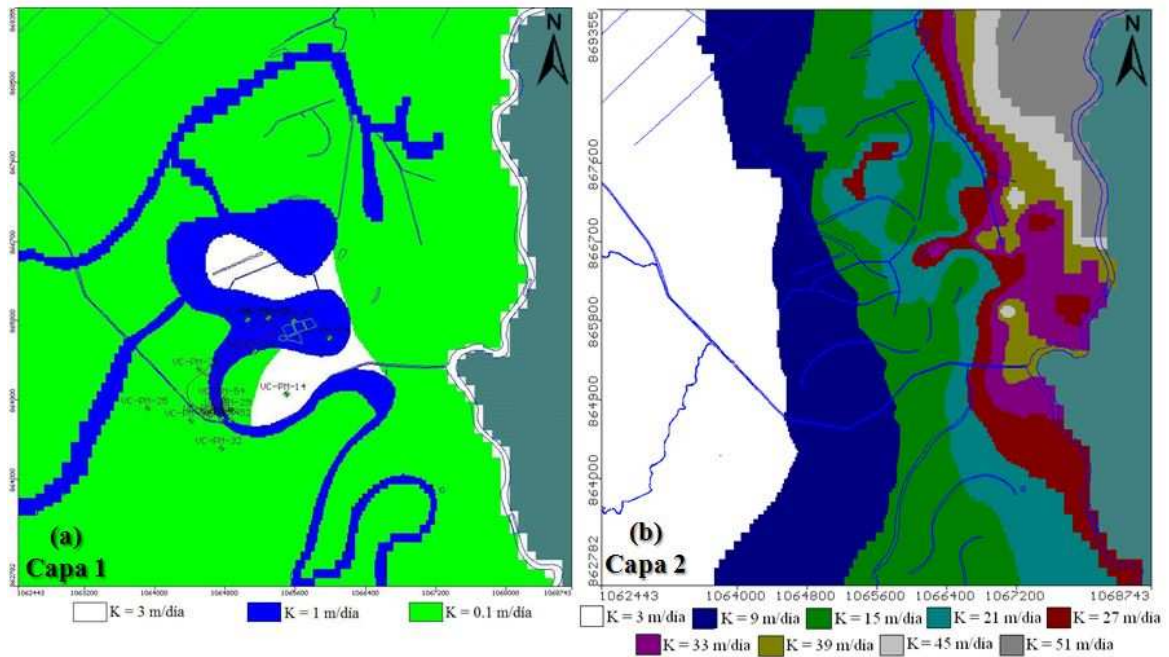
#### 5.3.1 Conductividades hidráulicas

La asignación de la conductividad hidráulica ( $K$ ) se realizó de manera independiente para cada una de las capas. En el caso de la **capa 1** (*Unidad Superficial*) se definieron 3 zonas: la primera de ellas es la que corresponde al material de tipo limo-arcillo-arenoso, al que se le asignó un valor de  $K = 0,1$  m/día; sobre las inmediaciones del antiguo cauce del río Cauca se asignó un valor de  $K = 1$  m/día y, finalmente, en los sectores en donde la Unidad Superficial se encuentra ausente se asignó un valor de  $K = 3$  m/día. En la Figura 5.4(a) se puede observar la distribución de las distintas zonas de conductividad hidráulica definidas para la capa 1.

En el caso de la **capa 2** se definieron 7 zonas de conductividad hidráulica. Para la diferenciación de estas zonas se tuvieron en cuenta las pruebas de bombeo realizadas por la CVC en los sectores *Sur* y *Norte* (CVC, 2006) y el mapa de transividades ( $T$ ) realizado por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal de la ciudad de Cali (DAPM-CON-05, 2005). Una vez evaluado y comparado este mapa con los valores reportados por CVC se procedió a su digitalización. Como el espesor ( $h$ ) de la *Unidad A* es conocido, se aplicó la expresión (5-2) para el cálculo de la conductividad hidráulica:

$$K = \frac{T}{h} \quad (5-2)$$

En la Figura 5.4(b) se observa la distribución de los valores de conductividad hidráulica para la capa 2. La zona de menor conductividad hidráulica se ubica en el sector *Oeste* con un valor de  $K = 3$  m/día. En las cercanías del relleno de Navarro se asignaron valores de 9 a 15 m/día. Sobre el sector *Nor-Este* se asignaron valores de  $K$  entre 27 y 51 m/día. Además, en esta capa se consideró anisotropía y homogeneidad con las siguientes relaciones:  $K_x = K_y$  y  $K_z = 0.1K_x$ . Los mapas resultantes fueron incorporados al SIG que forma parte de los productos de esta tesis de Maestría.



**Figura 5.4 Distribución de conductividades hidráulicas por capa**

### 5.3.2 Porosidad total y efectiva

La porosidad es requerida, fundamentalmente, para el cálculo del transporte de partículas. Esta asignación se realizó en función de los materiales identificados en cada capa, asignándoles valores reportados en la literatura especializada (Sanders, 1998). A la capa 1 (constituida por material predominantemente arcillo-limo-arenoso) se asignó un valor de porosidad total de 35% y uno de porosidad efectiva de 15%. A la capa 2 se asignó una porosidad total de 25% y una efectiva de 20%.

### 5.3.3 Coeficiente de Almacenamiento ( $S$ )

Los parámetros  $S_s$  y  $S_y$  son utilizados para el cálculo del coeficiente de almacenamiento ( $S$ ), tanto para acuíferos libres como confinados. En el caso de un acuífero confinado el agua es liberada del almacenamiento (por disminución de presión o descenso de carga hidráulica) a través de dos mecanismos: expansión del agua y compactación del material geológico del acuífero, debido a la descompresión que se produce. El coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) en este caso es el producto del almacenamiento específico ( $S_s$ ) y del espesor del acuífero ( $b$ ); siendo  $S = S_s \cdot b$  (no se requiere  $S_y$ ).

En cambio, en acuíferos libres el origen del agua que puede ser liberada se debe únicamente al vaciado por drenaje gravitacional a partir del descenso de la superficie

freática. El volumen de agua obtenido por unidad de volumen coincidirá, entonces, con la porosidad eficaz de la zona saturada. Es decir, la liberación de agua en un acuífero libre se debe a la capacidad específica de la unidad ( $S_y$ ), así como al almacenamiento específico ( $S_s$ ) de ella. Por lo que, el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) se calcula como  $S = S_y + h \cdot S_s$  donde  $h$  es el espesor de la zona saturada del acuífero. Sin embargo ante gradientes hidráulicos menores al 10% se puede desprestigiar la capacidad específica ( $S_y < h \cdot S_s$ ), considerando estos acuíferos como confinados ( $S = h \cdot S_s$ ) (Espinoza, 2006).

Para el caso de la capa 1 se asignaron los siguientes valores:  $S_s = 0,019$  y  $S_y = 0,15$ . En función de los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo por CVC, en la *Unidad A* o capa 2 se asignó un valor de  $S_s = S_y = 0,25$ .

Puede suceder que, durante el proceso de calibración, los valores iniciales de los parámetros anteriores, así como la distribución de las zonas de conductividad hidráulica, pueden sufrir variaciones. Cabe aclarar que estas modificaciones deberán ser acordes a la información y características hidrogeológicas del área de interés.

#### **5.4 Asignación de las condiciones de borde**

La siguiente etapa en la implementación del modelo de flujo es la asignación de las condiciones de borde, las cuales establecen las entradas y salidas de agua del sistema. Para la implementación de este modelo se han definido las siguientes: altura constante, río y recarga.

Al asignar las condiciones de borde se consideró que la escala temporal fuese lo suficientemente amplia como para poder alcanzar uno de los objetivos propuestos, cual fue “evaluar la respuesta del sistema acuífero a los lixiviados producidos por el vertedero de residuos sólidos”. Se recuerda que el relleno comenzó sus operaciones en la década del '60 y que, según las estimaciones realizadas (Collazos, 2004; Serviambientales S.A., 2000), los diferentes cerros tendrán una producción continua de lixiviados, por lo menos, hasta el año 2020.

### 5.4.1 Carga constante

Este tipo de condición fue establecida en el límite *Oeste* del dominio. Esta representa la entrada al dominio del modelo del flujo subterráneo. El valor de carga en cada celda se estableció teniendo en cuenta la altura de agua existente (nivel piezométrico) en cada una de ellas. Los valores se encuentran entre los 960 y 961 m.s.n.m., para todo el período de simulación. En la Figura 5.5 se observa las celdas definidas en el modelo como altura constante.

### 5.4.2 Río

Sobre el límite *Este* del dominio se estableció la condición de borde tipo río. Las celdas a las que se asignó esta condición corresponden el sector en el cual el río Cauca limita la zona de estudio. Igualmente, este tipo de condición fue asignada a las celdas donde se evidencia la presencia de los ríos Meléndez, Lili y canal CVC (Figura 5.5). En cada uno de los sectores del modelo donde se impuso esta condición de borde se estimó el valor de conductancia, la que fue calculada respetando las características propias de cada cuerpo de agua. A continuación se presentan las estimaciones realizadas:

#### • Características del Río Cauca

Para la determinación de las características del río Cauca se recurrió al informe “*Muestreo sedimentológico del lecho de río Cauca y principales tributario*”, (CVC-PMC, 2006). La zona del río Cauca presenta las siguientes características:

Espesor promedio del lecho:	4m
Material de fondo:	Mezcla de arcilla y Arena media
Ancho promedio de la sección:	80m
Altura del espejo de agua:	2,7m

En función de las anteriores características, se calculó la conductancia para el río Cauca, mediante la expresión (5-3).

$$C_{RCauca} = \frac{K \times L \times W}{M} \quad (5-3)$$



En donde:

$C_R$  : Conductancia ( $m^2/día$ )

$K$  : Conductividad del material de fondo ( $m/día$ )

$L$  : Largo de la celda (m)

$W$  : Ancho del río (m)

$M$  : Espesor del lecho (m)

Remplazando los valores correspondientes en la expresión (5-3) se obtuvo el valor de la conductancia para el río Cauca.

$$C_{RCauca} = \frac{0.2m/día \times 50m \times 80m}{4m} \approx 200m^2/día$$

#### • *Características de los ríos Meléndez y Lili*

Para los ríos Meléndez y Lili se asignó un valor inicial de conductancia de  $50 m^2/día$ . A priori se sabe que este valor deberá ser modificado en la etapa de calibración del modelo debido a la incertidumbre en los valores de las variables y parámetros que intervienen en el cálculo.

#### • *Características del Canal CVC*

En la zona de estudio el canal CVC posee una longitud de 4250 m y su lecho se encuentra no revestido. Este canal posee un ancho promedio de 10m; el material del fondo se clasifica como de tipo arcillo-limoso por lo que se le asignó una conductancia de  $100 m^2/día$ . Este mismo valor se asumió en las celdas donde se definió la presencia de la *Madrevieja* (paleocauces con presencia constante de agua) representada a través de este tipo de condición de borde.

### 5.4.3 Recarga

La recarga representa la entrada de agua al sistema como resultado del excedente de la precipitación que percola a través del terreno y alcanza el sistema acuífero. En este trabajo se estimó una recarga potencial de 260 mm/año. Este valor fue asignado a la capa 1 del modelo matemático. El valor de recarga asumido es un valor cercano al 20% de la precipitación anual en la zona de estudio. Este porcentaje es el mismo que ha sido

reportado por CVC en estudios de balance hídrico regional como aporte al acuífero superficial (CVC-REGLA-AS, 2009).

#### 5.4.4 Celdas inactivas para el flujo

Cuando se define la malla del modelo, Visual Modflow considera a todas las celdas activas; es decir, en ellas se calculará la variable de estado (nivel de agua o concentración, según corresponda). Para el caso particular del área de estudio todas las celdas que se encuentran al *Este* del río Cauca fueron definidas como celdas inactivas.

La Figura 5.5 muestra las condiciones de bordes mencionadas anteriormente y las celdas inactivas establecidas en el dominio del sistema a modelar.

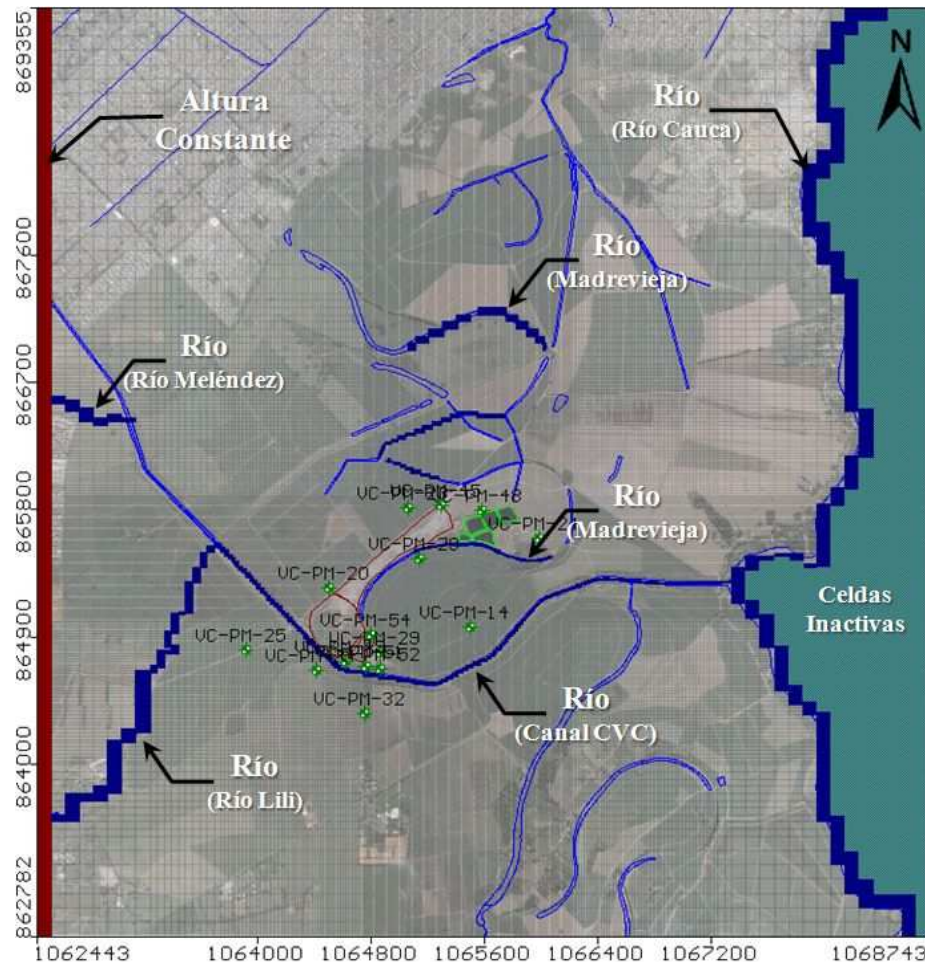


Figura 5.5 Condiciones de borde establecidas en el modelo

## 5.5 Condiciones de ejecución del modelo de flujo

Debido a la estabilidad que presentaron los niveles estáticos y las condiciones de borde durante el período (2000 - 2009), y la ausencia de pozos de explotación cercanos a la zona de estudio que modifiquen considerablemente el comportamiento del sistema de flujo, se optó por calibrar el modelo de flujo en condiciones de estado estacionario.

El método seleccionado para la resolución del sistema de ecuaciones de flujo fue el método *WHS solver* que, como todo método iterativo brinda una aproximación a la solución. En este caso utilizando una rutina de aceleración para el método estabilizado de gradientes bi-conjugados. La ventaja del método *WHS solver* radica en el incremento de la eficiencia y la estabilidad de la solución (Waterloo Hydrogeologic, 2005).

## 5.6 Calibración del modelo de flujo

La calibración es sin duda la etapa más crítica del proceso de simulación del flujo de agua subterránea. En ella se sustenta no solo la fidelidad del sistema que se intenta representar sino también que se fundamentan los resultados que se obtendrán en etapas subsiguientes. Como se mencionó con anterioridad, el modelo de flujo se calibró en régimen estacionario. Los valores de los parámetros utilizados en primera instancia son coincidentes con los definidos para el modelo conceptual.

De acuerdo a Espinoza (2006) y Anderson y Woessner (2002), para obtener una buena estimación de la conductividad ( $K$ ) se debe elegir muy bien el período que se utilice en la calibración. Lo ideal es un período en que los parámetros relevantes (recargas, descargas, niveles estáticos) sean conocidos y permanezcan inalterados (constantes) para asegurar un mejor ajuste de los niveles estático.

### 5.6.1 Período de calibración

En vista a lo enunciado anteriormente, la fecha escogida para la calibración del sistema en estado estacionario fue la del 21 de Febrero de 2004. Esta elección se debe a:

- A partir de 2000 se observó una estabilización de los niveles estáticos y, particularmente, durante el año 2004 el acuífero mantuvo sus niveles estables.
- En el período no se presentaron eventos hidrológicos extraordinarios (precipitaciones máximas) ni tampoco bombeos excesivos en los pozos cercanos.

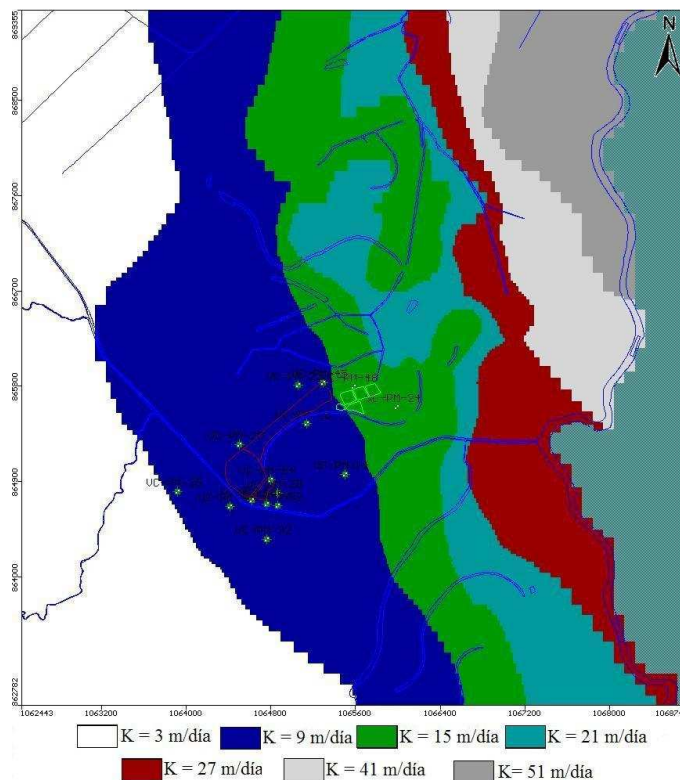
- Esta fecha cuenta con la mayor cantidad de información espacial (20 sitios de observación con sus respectivas variables medidas).

### 5.6.2 Propiedades modificadas

Para conseguir una adecuada calibración del modelo de flujo, fue necesario realizar un ajuste de los parámetros inicialmente asignados al modelo. Se tuvo como premisa que los nuevos valores asignados se encontraran dentro de un rango de magnitud coherente a los materiales sedimentarios definidos en el modelo conceptual. Los parámetros que sufrieron modificaciones son los siguientes:

- **Conductividad hidráulica ( $K$ ):**

Las modificaciones de  $K$  se realizaron en la capa 2. Se redefinió la zona *Oeste*, específicamente entre las zonas de  $K = 3$  m/día y 9 m/día; sobre el sector *Nor-Este* se eliminaron 3 zonas, las cuales fueron re-asignadas con valores de  $K = 41$  m/día y 51 m/día. La Figura 5.6 muestra la nueva distribución de conductividades de la capa 2.



**Figura 5.6 Nueva distribución de las conductividades hidráulicas Capa 2**

• **Recarga:**

Se consideró la adición de dos nuevas zonas de recarga. La primera de ellas se ubicó hacia el sector *Nor-Oeste* del área, coincidente con un sector de zona urbanizada. Se asumió que la misma presenta un porcentaje de área impermeable del 20%, lo que se traduce en una disminución del valor de recarga a 56 mm/año. La segunda zona en donde se definió un tercer valor de recarga, fue en la base de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*, en los cuales se adicionaron 260 mm de recarga anual como consecuencia del pequeño domo observado, producto del efecto de la precipitación, la humedad de los residuos y el lixiviado generado en dichos cerros.

• **Conductancia de ríos**

Debido a la falta de datos de campo que permitieran asignar valores más adecuados para el cálculo de la conductancia (como por ejemplo espesor del lecho, conductividad hidráulica de los materiales del lecho del río), el valor de conductancia fue otro de los parámetros que debieron ser calibrados. Se considera que los cuerpos de agua internos al dominio inciden de manera significativa en la configuración de las líneas equipotenciales, especialmente en los sectores cercanos al relleno. En la Tabla 5.1 se observan los valores finales (ajustados) de la conductancia de los diferentes cursos de agua que se modelan en el área de estudio.

**Tabla 5.1 Conductancias finales para la condición de borde río**

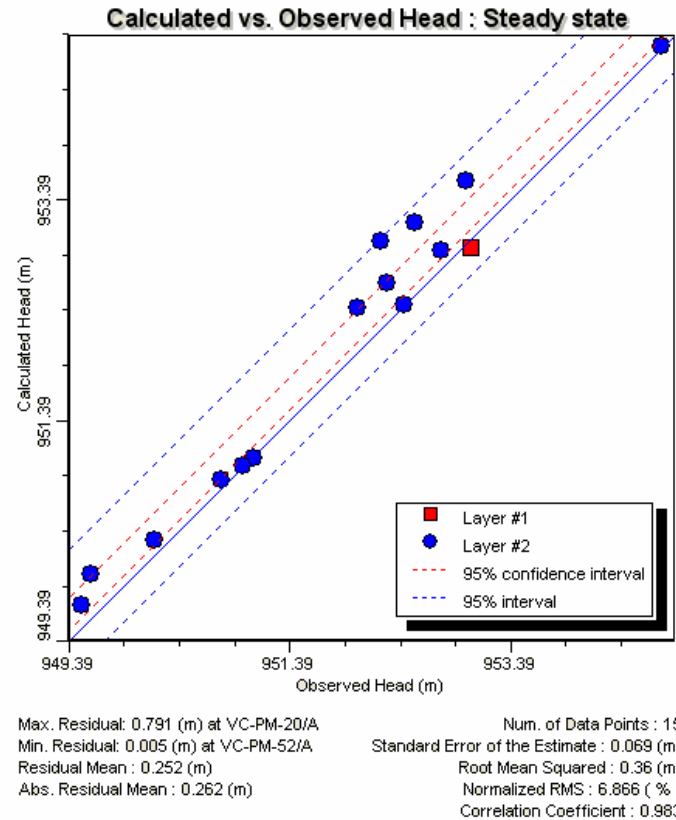
Río	Cauca	Meléndez	Lili	Canal CVC	Madreviejas
Conductancia (m <sup>2</sup> /día)	400	100	50	100	100

**5.6.3 Valores observados vs calculados**

La distribución de las nuevas zonas de conductividad hidráulica, recarga y valores de conductancia en las condiciones de borde río, permitieron alcanzar un aceptable ajuste de los niveles calculados por el modelo (Figura 5.7).

La calibración alcanzada presente un coeficiente de correlación, entre cargas observadas y calculadas, de 0,983. El error medio cuadrático normalizado (RMS) arroja un valor de 6,87%, y un error estándar de estimación de 0,069 m. La máxima diferencia entre niveles observados y calculados se presentó en el pozo Vc-pm-20 (0,8 m) y la mínima diferencia

se presentó en el pozo Vc-pm-52 (0,005 m). En términos generales se considera que valores de RMS normalizado menores a 10% indican una calibración aceptable, e inferiores al 5% una muy buena calibración.



**Figura 5.7 Correlación de niveles calculados vs. observados – Modelo inicial**

#### 5.6.4 Análisis de la calibración

En función del proceso de calibración, del porcentaje de error obtenido y de la importancia que revistió la asignación de las condiciones de borde río (*Madrevieja*) como modificadoras del sistema de flujo local en las inmediaciones del relleno, se optó por proponer un modelo a nivel de local, con lo cual se redujo el área a modelar. Se logró así, una mejor representación de la zona de interés, lo cual incluyó:

- Reducción del dominio del modelo
- Refinamiento de la malla
- Orientación de la malla en la dirección de flujo en las inmediaciones del relleno
- Se mantuvieron las principales condiciones de borde hidrológico y valores de las propiedades hidrogeológicas ( $K$ ,  $S_s$ ,  $S_y$ ,  $m$  y  $m_e$ ).



A continuación se presenta una descripción de las principales características de modelo numérico local propuesto.

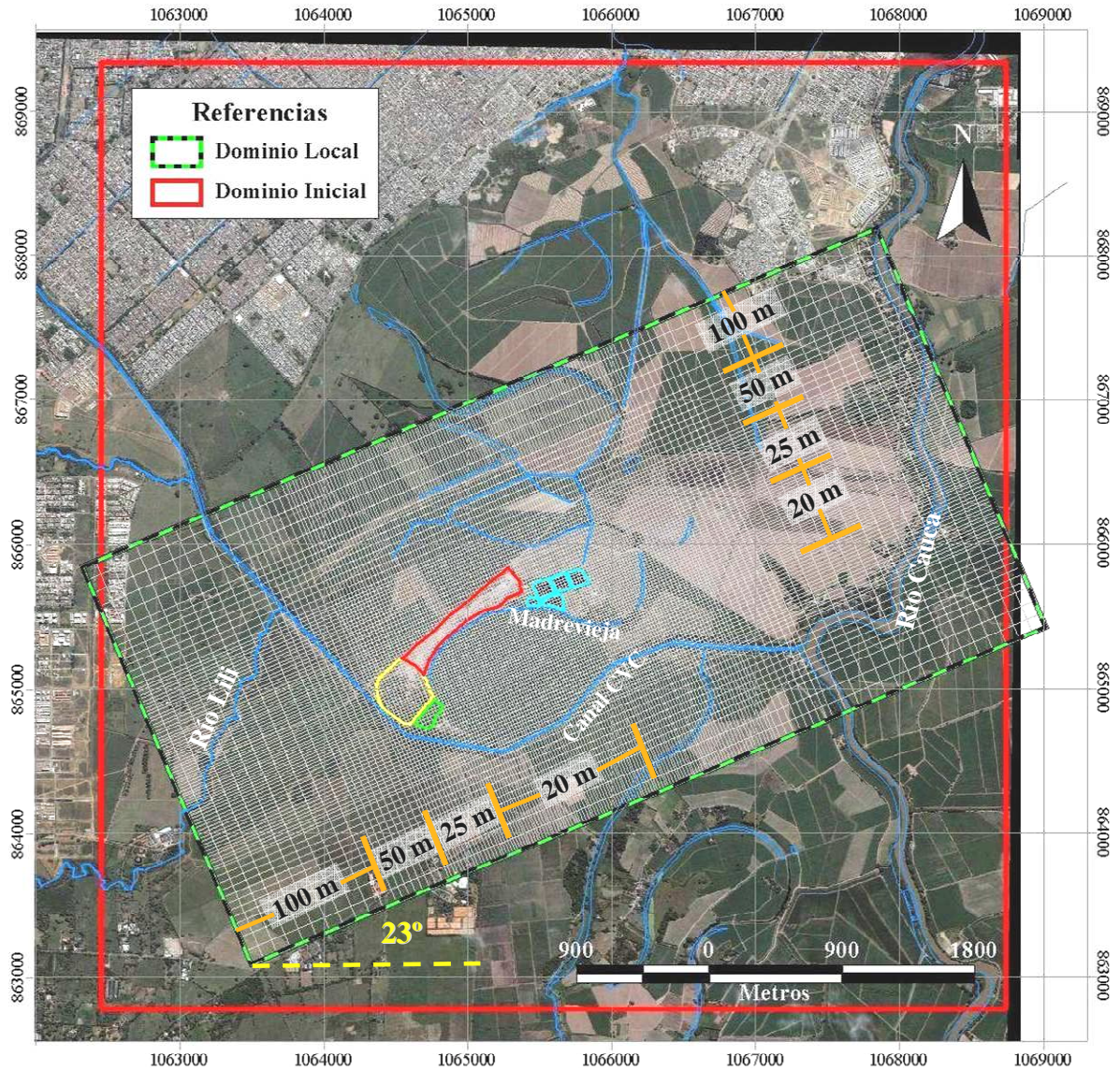
## **5.7 Modelo numérico local**

Para el modelo local se definió un área 3 Km de ancho por 6 Km de largo, abarcando una superficie de 18 Km<sup>2</sup>. Con el fin de lograr que las celdas del modelo en las inmediaciones del relleno sanitario se orientaran de manera paralela a las líneas equipotenciales presentes en dicho sector, la grilla del modelo se giró un ángulo de 23°.

### **5.7.1 Discretización de la malla local**

Para la discretización del dominio se siguieron los mismos criterios planteados en el modelo inicial. Se confeccionó una malla no uniforme, la cual se refinó en la zona del relleno. Los tamaños de celda asignados fueron de 100x100 m en el borde del dominio y de 20x20 m en el relleno y sus inmediaciones. En el resto del área las celdas van creciendo progresivamente desde los 20 hasta los 100 m (Figura 5.8).

En cuanto a la discretización vertical, en el modelo local se consideró como límite superior la topográfica del sector y como límite inferior la cota de 837 m.s.n.m. para todo el dominio. Las dos capas consideradas inicialmente se subdividieron en nueve capas, las cuales conservaron las propiedades calibradas en el modelo inicial. La capa 1 original se subdividió en tres capas y la capa 2 original, en seis capas. Dicha subdivisión se realizó con el fin de eliminar la existencia de celdas secas en la capa 1 y una mejor asignación de los parámetros al simular el transporte (*condiciones de borde de concentración constante*).



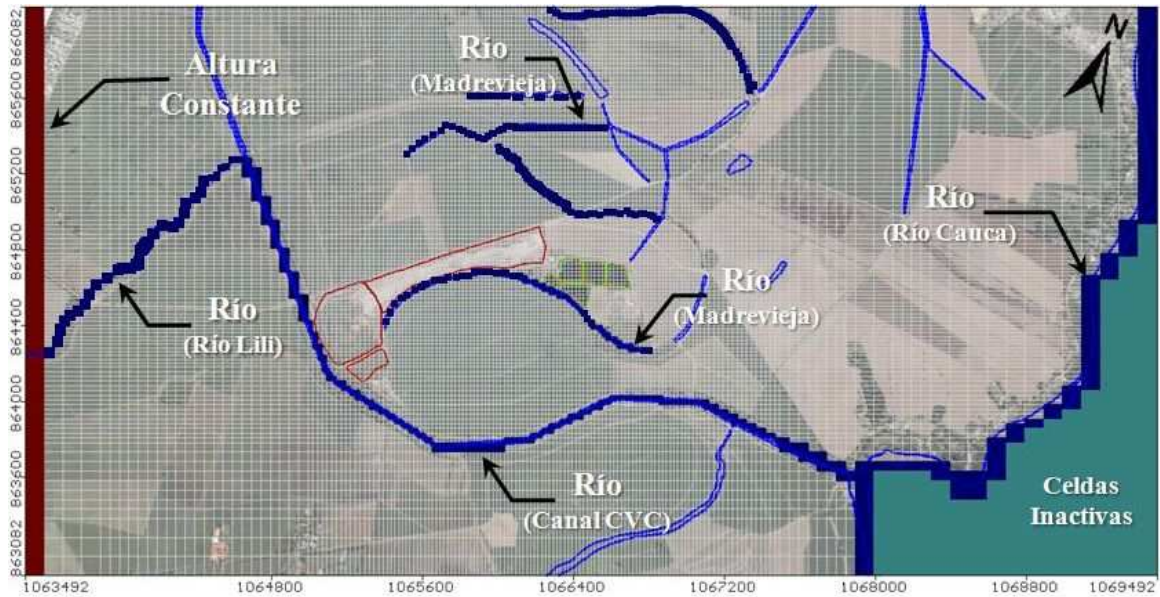
**Figura 5.8** Dominio del modelo local y discretización de la malla

### 5.7.2 Condiciones de borde locales

Como se mencionó anteriormente, se conservaron las condiciones de borde hidrológicas. En el borde *Sur-Oeste* se definió una condición de tipo altura constante con un valor igual a la equipotencial de 959 m.s.n.m.; y sobre borde *Nor-Este* se asignó la condición tipo río (río Cauca). En el *Anexo 5* se presentan los niveles de agua superficial para el modelo local propuesto.

En la Figura 5.9, se observan las condiciones de borde internas establecidas para el modelo local.





**Figura 5.9 Condiciones de borde modelo local**

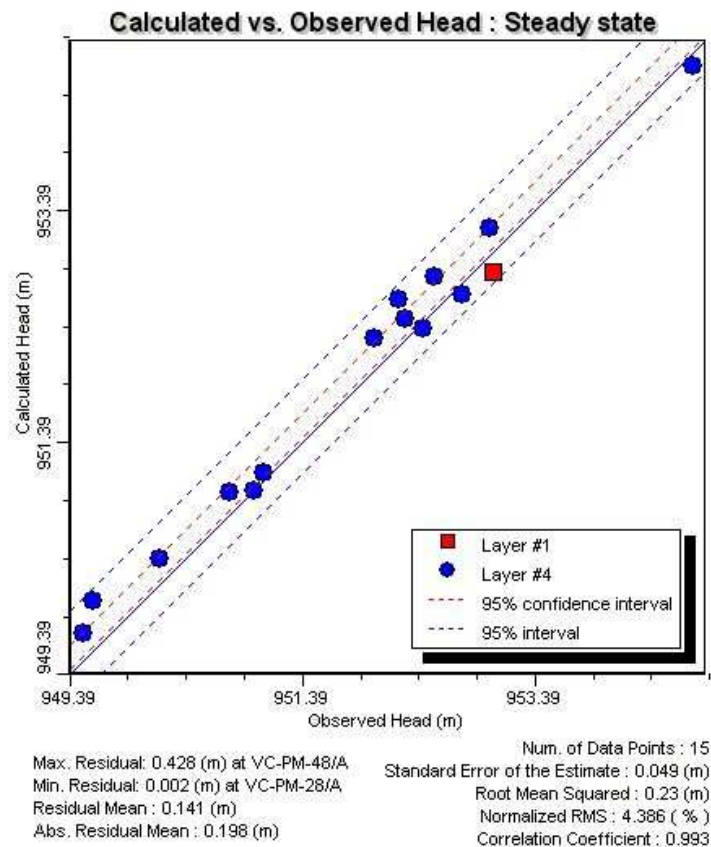
La Tabla 5.2 presenta los valores de conductancia asignados a cada curso.

**Tabla 5.2 Conductancias asignadas para los cursos de agua en el modelo local**

Río	Cauca	Lili	Canal CVC	Madreviejas
Conductancia (m <sup>2</sup> /día)	600	100	400	100

### 5.7.3 Análisis de calibración local

Al considerar el modelo local fue notoria la mejora producida en la calibración del modelo de flujo, alcanzándose un porcentaje de error medio cuadrático  $RMS = 4,39\%$ . La máxima diferencia entre niveles se presentó en el pozo Vc-pm-48 (0,43 m). La mínima diferencia se presentó en el pozo Vc-pm-28 (0,002 m). El coeficiente de correlación obtenido en esta oportunidad es de 0,993 (Figura 5.10).



**Figura 5.10** Correlación de niveles calculados vs. observados – Modelo local.

## 5.8 Balance de masas

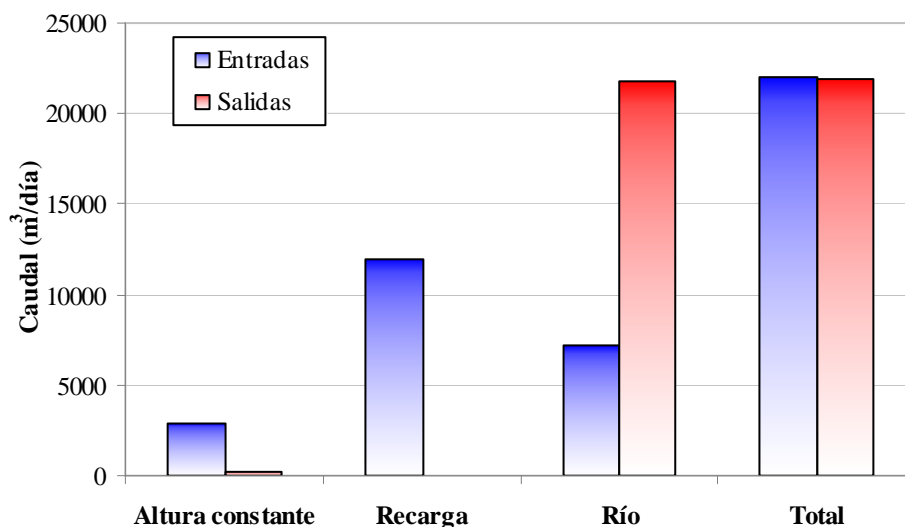
Las ecuaciones diferenciales que describen el flujo en un medio poroso saturado (conservación de la masa / continuidad) plantean un balance entre el agua que ingresa y sale del sistema. Por tanto, una correcta calibración del modelo de flujo será aquella que de lugar a un balance de materia sin discrepancias entre las entradas y salidas de agua del sistema (Fernández, 2004).

En la Tabla 5.3 se puede observar el resultado del balance de masa general, en función de las entradas y salidas de agua para cada una de las condiciones de borde definidas. En este balance se destaca la recarga como principal fuente de entrada de agua al sistema (54%). La entrada que se produce a través de la condición de borde tipo río representa un 33% del total de las entradas. Y por último, la condición de tipo carga constante aporta al sistema el 13% del agua que ingresa al mismo. En cuanto a las salidas, el balance indica que la principal salida de agua del sistema es la condición de borde tipo río, con un porcentaje de 99%.

**Tabla 5.3 Balance de masa general.**

Tipo de condición	Entrada (m <sup>3</sup> /día)	Salida (m <sup>3</sup> /día)
<i>Altura constante</i>	2882	207
<i>Recarga</i>	11950	0
<i>Río</i>	7162	21741
<b>Total</b>	21994	21948
Entrada – Salida = 46 m <sup>3</sup> /día		
Discrepancia = 0.21 %		

En la Figura 5.11 se presentan los resultados del balance del modelo local. Este balance muestra una adecuada coincidencia con el planteamiento del modelo conceptual. La baja diferencia entre los caudales de entrada y salida del sistema (46 m<sup>3</sup>/día), es decir, la baja discrepancia obtenida (0,21%) permite asumir que se alcanzó una muy buena representación del sistema acuífero.



**Figura 5.11 Balance de masa general del sistema local**

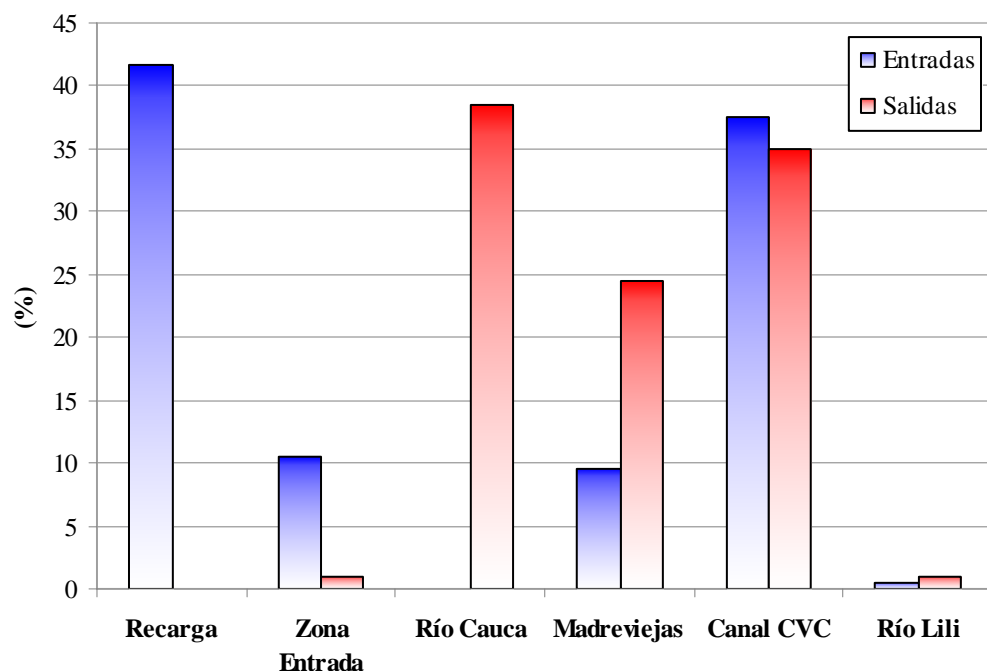
Con el objetivo de conocer la relación existente entre cada una de las condiciones de frontera definidas y el medio acuífero, para el balance de masas se definieron 6 zonas: la zona correspondiente al acuífero se definió como *Zona 1*; el borde Oeste, en el cual se asignó la condición de altura constante se definió como *Zona 2*; el sector del río Cauca se definió como *Zona 3*; las celdas que contienen a las *Madreviejas* se definieron como *Zona 4*; el canal interceptor CVC como *Zona 5*; y el río Lili como *Zona 6*.

En la Tabla 5.4 se presentan los diferentes porcentajes de entrada y salida de cada una de las zonas definidas anteriormente. En el caso de las entradas de flujo al sistema, la recarga representa el mayor ingreso, con un 42% del monto total. El canal CVC aporta un 37% y la zona correspondiente a los sectores de *Madrevieja* aportan un 10%. La principal fuente de salida de flujo del sistema está representada por las celdas asignadas a los ríos. Por el Río Cauca descarga el 39%, por el canal CVC el 36% y por los sectores asignados a la *Madrevieja* el 24%.

**Tabla 5.4 Balance de masa por zonas**

Zona	% Entrada	% Salida
Recarga	42	0
Zona Entrada	10	1
Río Cauca	0	39
Madreviejas	10	24
Canal CVC	37	36
Río Lili	0	1
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

En la Figura 5.12 se presentan los porcentajes de entrada y salida en cada una de las zonas. En tal sentido se destaca la importancia de los sectores de salida, debido a la posibilidad que conllevaría la migración de lixiviados hacia los cuerpos de agua superficial cercanos al entorno del relleno de Navarro.



**Figura 5.12 Porcentaje de entrada y salida de flujo por zonas**



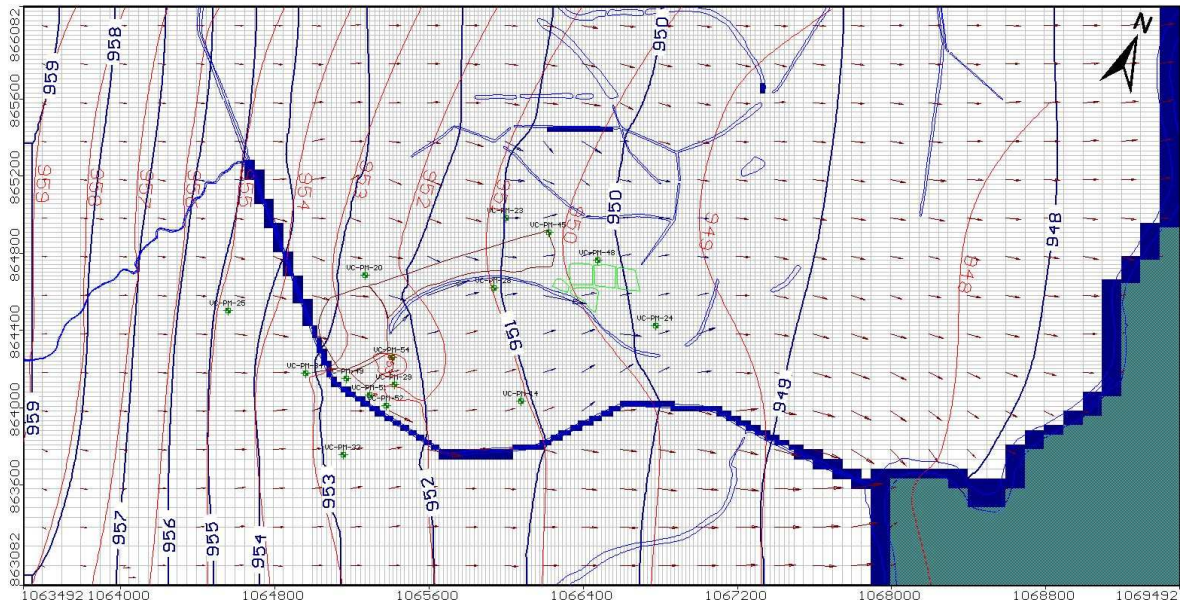
## 5.9 Resultados del modelo de flujo

Una vez verificada la calibración alcanzada, se está en condiciones de simular el posible efecto que los lixiviados generados en el relleno sanitario impondrían sobre el agua subterránea del sector. Sin embargo, previo a ello se comprobarán los resultados del modelo (curvas de nivel de agua calculado vs. curvas de nivel de agua observado, velocidades y direcciones de flujo) con los resultados obtenidos en estudios previos realizados en el área por la CVC.

### 5.9.1 Niveles equipotenciales y velocidades de flujo

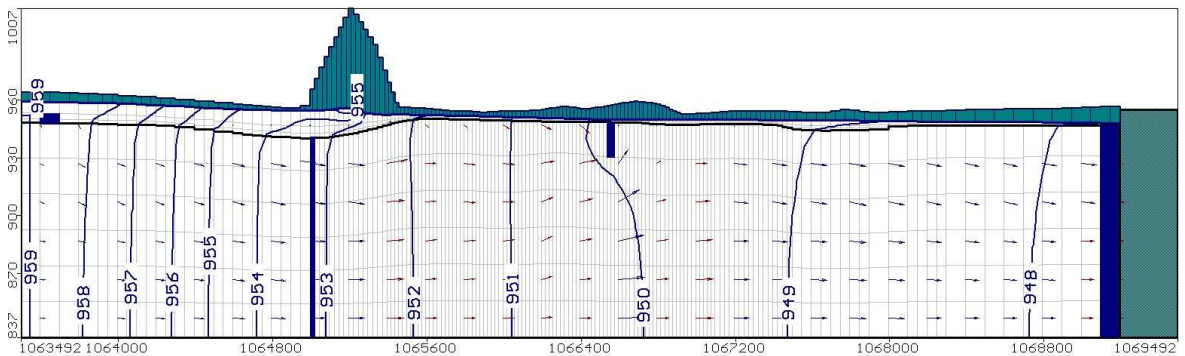
La Figura 5.13 presenta el mapa de niveles calculados y niveles observados. La misma muestra que el modelo implementado reproduce adecuadamente la configuración general de las líneas equipotenciales del área. Sobre los sectores *Oeste* y *centro* del modelo, el ajuste obtenido es más que satisfactorio. En el sector *Este*, en las cercanías del río Cauca, se produce una separación en la ubicación de las líneas equipotenciales. Sin embargo, las diferencias de cota no son significativas.

En el modelo también se pudieron estimar velocidades de flujo subterráneo. En el sector *Oeste* se presenta una velocidad promedio de 0,04 m/día. En las inmediaciones del relleno, el flujo alcanza una velocidad de 0,06 m/día y hacia el sector *Este*, en las cercanías del río Cauca, la velocidad se encuentra alrededor de los 0,15 m/día. Los valores obtenidos coinciden con los antecedentes reportados por CVC, en los cuales el sistema acuífero ha sido definido como un sistema de flujo muy lento con velocidades promedio entre 0,01 y 0,04 m/día (Azcuntar, 2000).



**Figura 5.13** Mapa de contorno de niveles calculados vs observados y vectores de velocidad de flujo

La Figura 5.14 presenta los vectores de velocidad en la fila 73 del modelo. Esta fila intercepta al cerro Antiguo y la *Madrevieja* más cercana al relleno de Navarro. En dicha sección, la velocidad de flujo es de 0,19 m/día.



**Figura 5.14** Perfil equipotenciales y vectores de velocidad de flujo – Fila 73

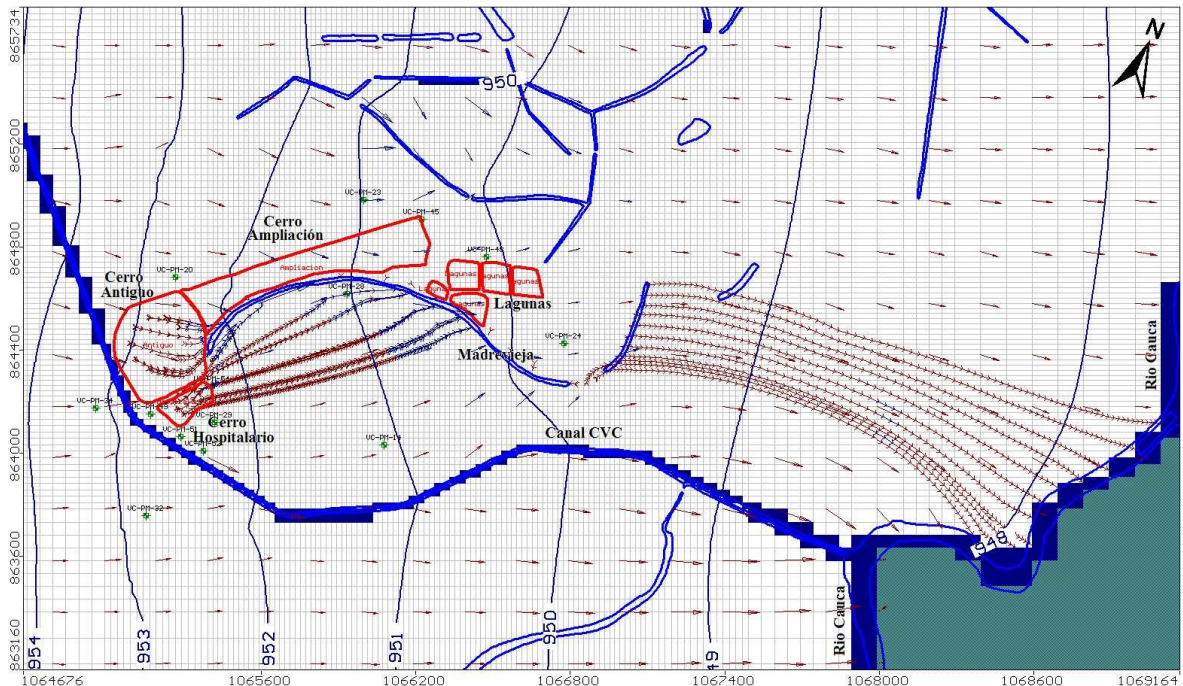
### 5.9.2 Seguimiento de partículas

Tal como se mencionó anteriormente, en la identificación de los procesos de contaminación existentes, los cerros *Antiguo*, *Hospitalario* y la *Madrevieja* constituyen las principales fuentes potenciales de contaminación al acuífero. Por consiguiente, para una aproximación inicial de la trayectoria del agua percolada desde estos sectores se recurrió al

código *Modpath* (Pollock, 1989), el que se acopla perfectamente a las salidas de *Modflow* para el seguimiento de la trayectoria de una partícula.

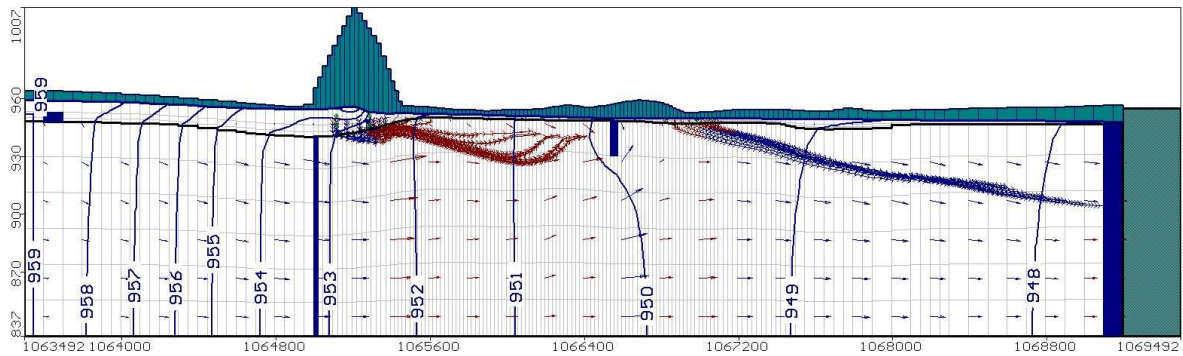
En el caso del relleno de Navarro, las partículas se asignaron alrededor de los cerros Antiguo y Hospitalario, y fueron direccionadas “hacia delante”. También se ubicaron partículas a lo largo de toda la *Madrevieja*. Como condición de finalización del recorrido de la partícula se seleccionó la opción de detenerse al encontrar un sumidero o borde. La Figura 5.15 presenta la trayectoria seguida por las partículas asignadas. Es de destacar que las partículas asignadas en el cerro Antiguo finalizan su recorrido en la zona aledaña a la *Madrevieja*, cerca del relleno, mostrando claramente la incidencia de la misma como potencial zona receptora del flujo proveniente de los cerros.

En el caso de la *Madrevieja* se puede apreciar que una gran parte de las partículas, asignadas en su tramo final, viajan hasta el río Cauca, siendo éste su destino final; por lo tanto, un posible receptor de los lixiviados originados en el relleno sanitario de Navarro.



**Figura 5.15 Seguimiento de partículas desde los cerros y Madrevieja**

La Figura 5.16 muestra una sección transversal del dominio con la trayectoria de las partículas en la fila 73. En esta figura se puede observar la profundidad alcanzada por las mismas (28 m de profundidad). En el caso de las partículas asignadas a la *Madrevieja* se aprecia que las partículas alcanzan una profundidad de 50 m en el sentido del flujo.



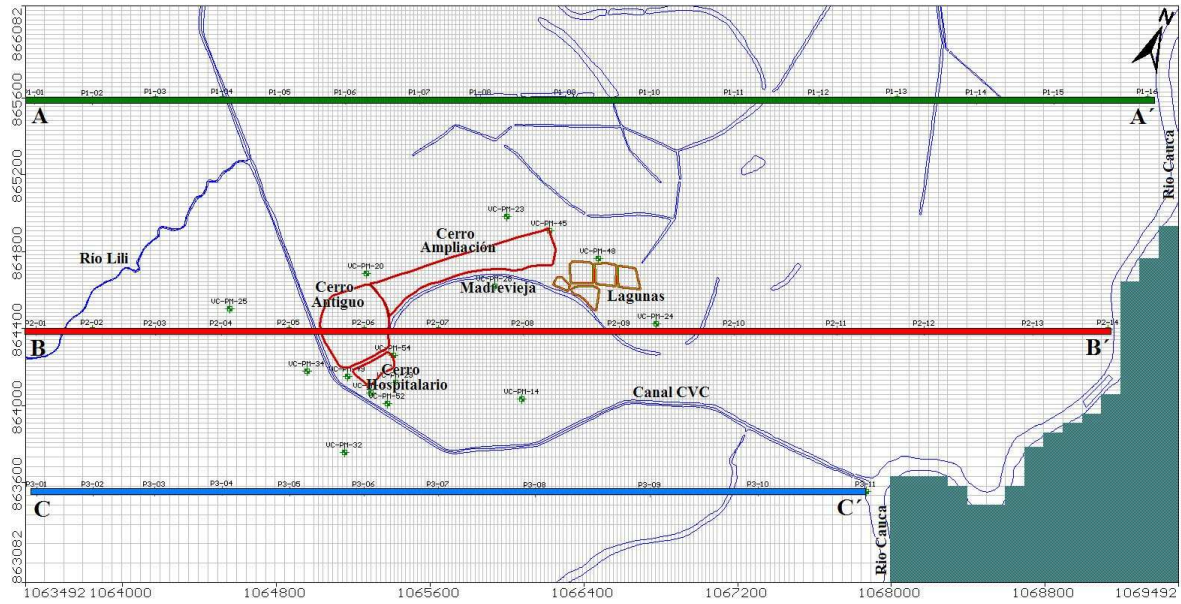
**Figura 5.16 Perfil de rastreo de partículas cerros Antiguo, Hospitalario y Madre Vieja – Fila 73**

La simulación realizada con Modpath permite evaluar el destino final de un contaminante que viaja a la misma velocidad que el flujo de agua subterránea (transporte advectivo). Por lo que los resultados alcanzados permiten plantear la posibilidad de que una pluma contaminante con origen en el relleno sanitario llegue a las inmediaciones del río Cauca. Cabe recordar que, aguas abajo de este sitio, sobre el río, se encuentra ubicada la bocatoma de agua para la ciudad de Cali, y que abastece al 70% de su población.

### 5.10 Análisis de Sensibilidad

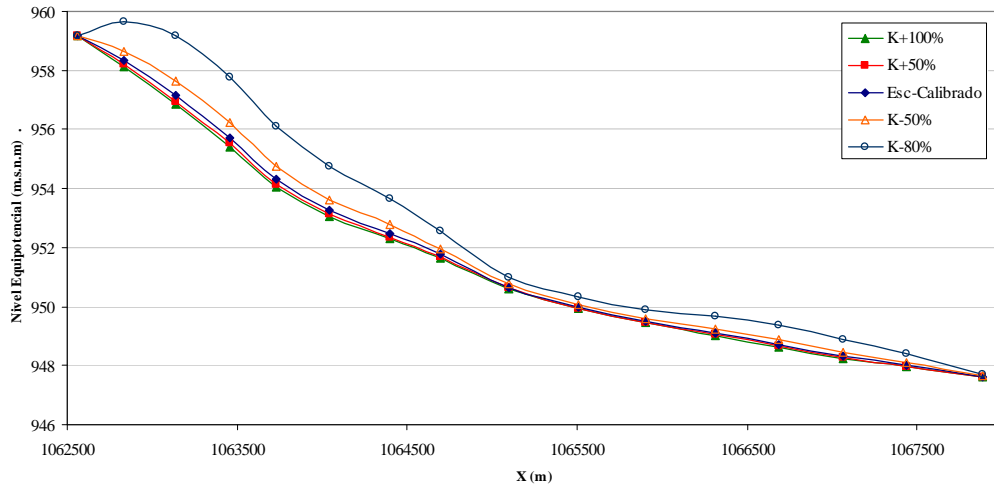
Con el fin de comprobar la sensibilidad del modelo implementado a las variaciones de los parámetros calibrados, se efectuaron simulaciones con incrementos y disminuciones porcentuales de: conductividad hidráulica ( $K$ ), coeficiente de almacenamiento ( $S$ ), porosidad eficaz ( $m_e$ ) y porosidad total ( $P$ ). Para comparar los resultados del modelo ante estas variaciones y su incidencia espacial, se evaluó el comportamiento del nivel piezométrico en tres secciones transversales:  $Y_1=865.600$  (Perfil A-A'),  $Y_2= 864.400$  (Perfil B-B'),  $Y_3=863.600$  (Perfil C-C'). Además se calculó el balance de masas para cada una de las situaciones planteadas (Figura 5.17). En el *Anexo 6. Variación de parámetros – Análisis de Sensibilidad*, se presentan los valores asignados en cada situación.



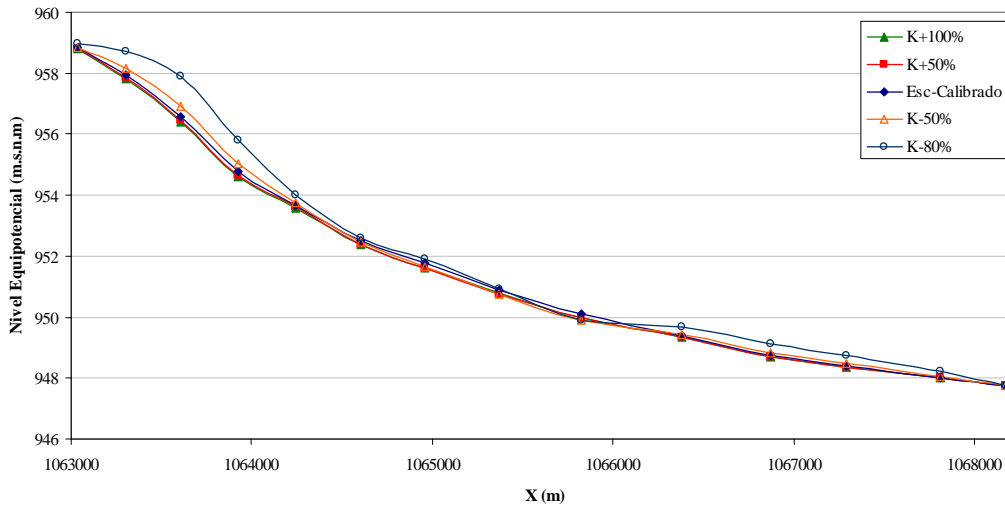


**Figura 5.17** Localización de perfiles de niveles equipotenciales

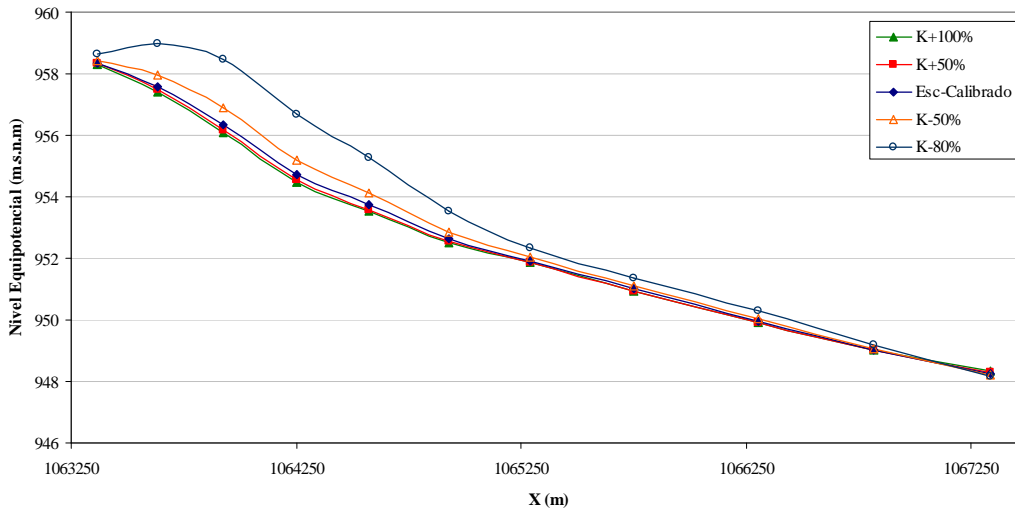
Para el caso de la conductividad hidráulica ( $K$ ) se realizaron simulaciones con un aumento del 100% y 50%; y disminuciones del 50% y 80% con respecto a los valores estimados en el proceso de calibración. En la Figura 5.18(a), (b) y (c) se presenta el comportamiento de los niveles equipotenciales para cada uno de los perfiles seleccionados. Se destaca que en el caso de los aumentos de  $K$ , los niveles presentan baja sensibilidad a la variación. Mientras que en el caso de las disminuciones graduales de  $K$  se observa que los niveles se incrementan significativamente en la primera mitad de perfil, en donde se presentan los menores valores de  $K$ .



(a)  
 Perfil A-A'



(b)  
 Perfil B-B'

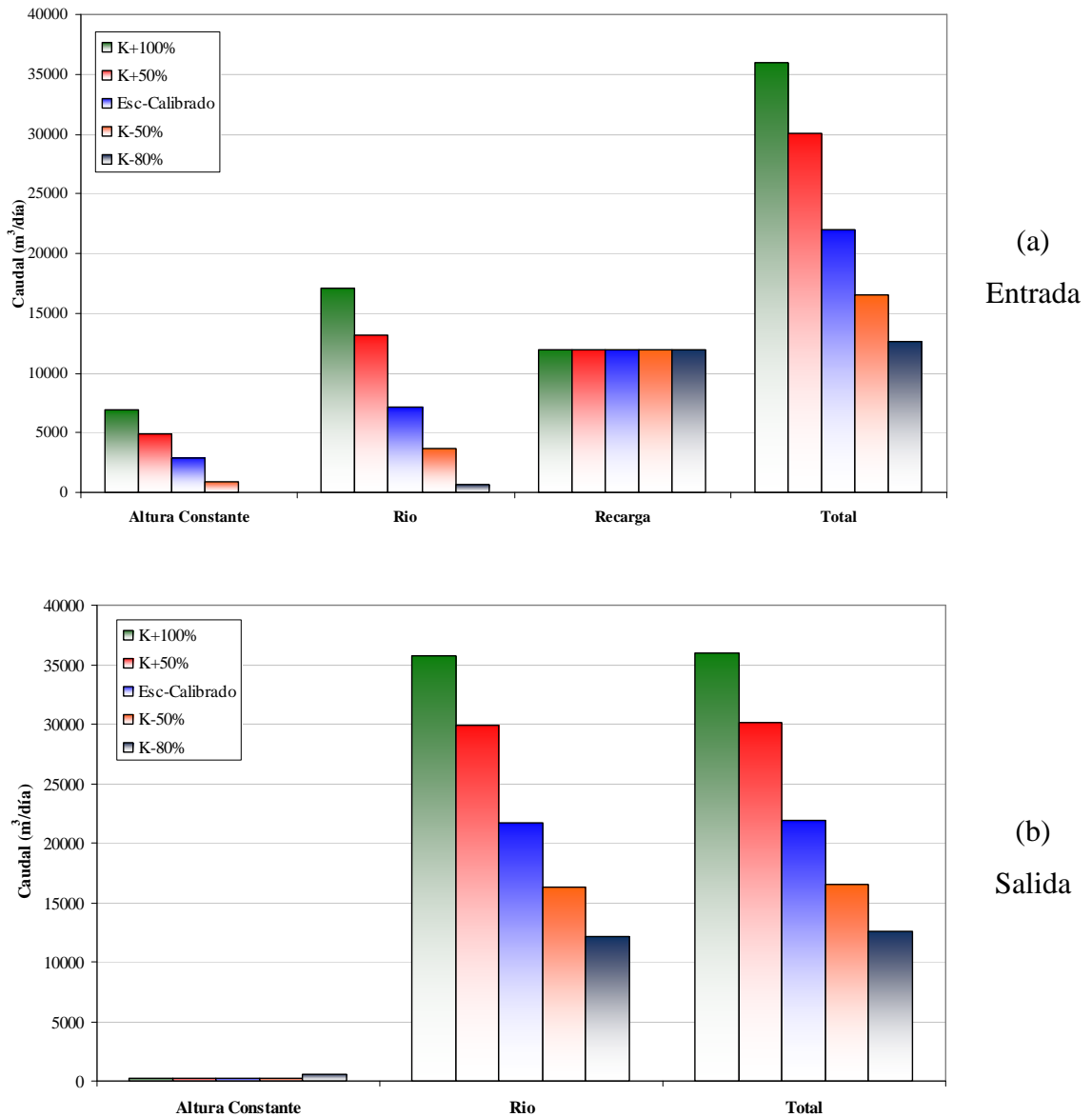


(c)  
 Perfil C-C'

**Figura 5.18 Comparación del comportamiento de niveles equipotenciales en los perfiles – variación de conductividad hidráulica (K)**

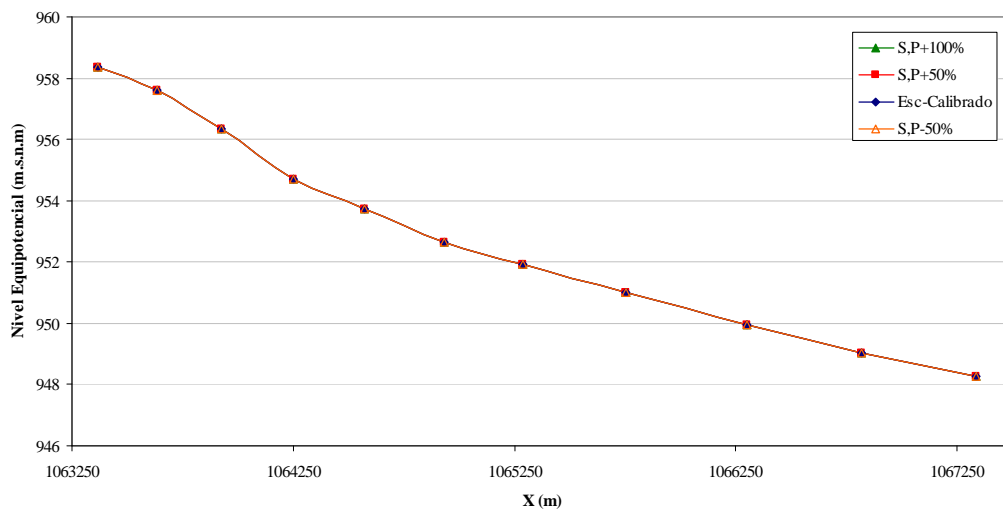
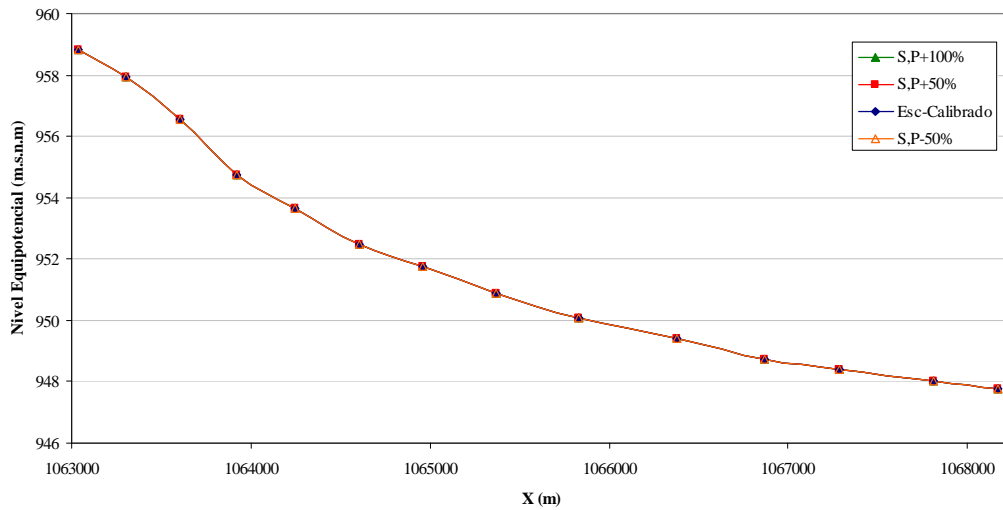
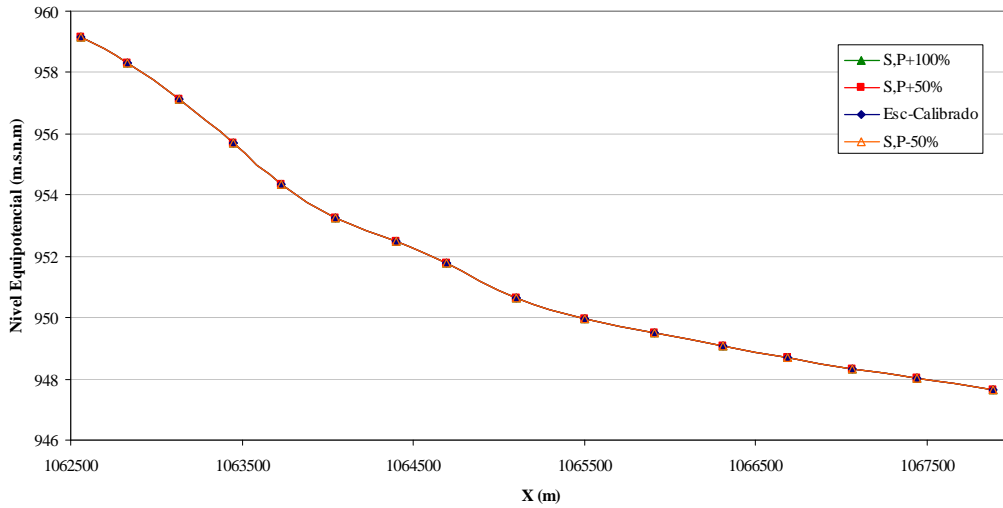


En la Figura 5.19(a) y (b) se presentan las variaciones producidas en el balance de masa del sistema que resultan más significativas. Se destaca que ante el aumento y disminución gradual del parámetro ( $K$ ), la magnitud del flujo, tanto de entrada como de salida, aumenta o disminuye de manera proporcional.



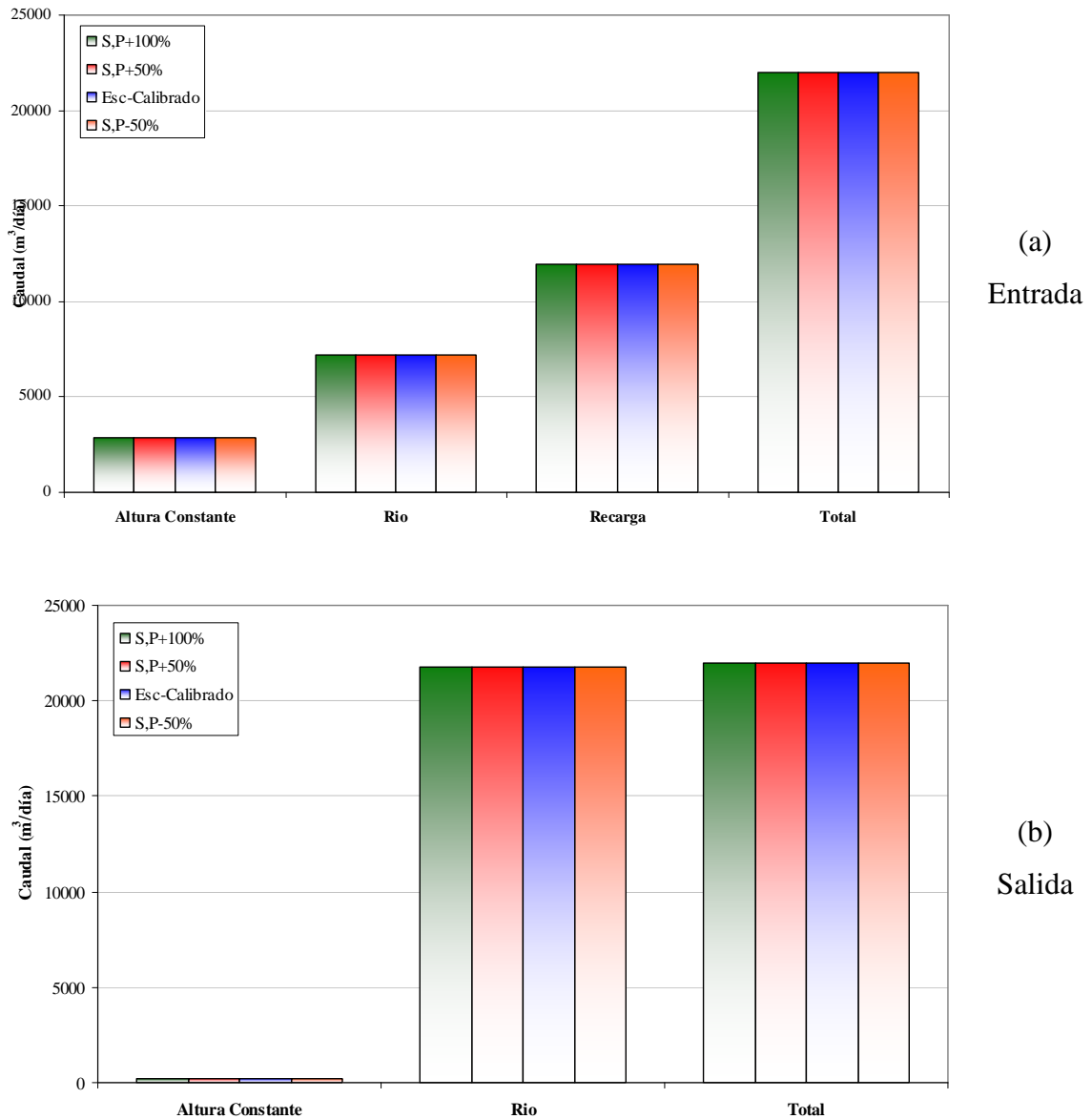
**Figura 5.19 Comparación de flujos de entrada y salida – variación de conductividad hidráulica ( $K$ )**

Al igual que para  $K$ , para el coeficiente de almacenamiento ( $S$ ), la porosidad total y la porosidad eficaz se realizaron sucesivas simulaciones, con aumentos y disminuciones del 100% y 50% de los valores finales de calibración. Sin embargo, tal como se observa en la Figura 5.20(a), (b) y (c), no se presentaron diferencias significativas en los perfiles propuestos, con lo cual se establece la baja sensibilidad de estos parámetros.



**Figura 5.20** Comparación del comportamiento de niveles equipotenciales en los perfiles – variación *S* y *P*

Para el balance de masas se obtuvieron resultados similares (Figura 5.21). Es decir, no se apreciaron cambios entre los escenarios planteados, ratificando así la baja sensibilidad que presentan dichos parámetros.



**Figura 5.21** Comparación de flujos de entrada y salida – variación de S y P

Tanto del proceso de calibración del modelo local como del análisis de sensibilidad efectuado se puede concluir que el parámetro más sensible para representar y simular el comportamiento del sistema acuífero en el área de estudio es la conductividad hidráulica.

## Capítulo 6: Implementación del modelo de transporte de contaminantes

### 6.1 Aspectos Generales

Uno de los objetivos particulares perseguidos en esta tesis de Maestría, es representar la posible trayectoria del agua percolada a través de los residuos depositados en el relleno de Navarro. Para dar cumplimiento a este objetivo y en función de los datos disponibles se seleccionó, de entre los componentes derivados del lixiviado, al cloruro. Este elemento tiene la capacidad de no formar sales de baja solubilidad, no oxidarse, no reducirse en aguas naturales, no ser adsorbido significativamente, ni entrar a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le confiere un carácter de trazador casi ideal (Appelo y Postma, 1993; Mc Farlen *et al.*, 1983). Para la implementación del modelo de transporte se partirá del modelo de flujo local calibrado en las etapas precedentes.

A continuación se presentan algunos aspectos generales relacionados con la modelización matemática del transporte. Posteriormente se describirán los diferentes escenarios de transporte a modelar, se hará mención del tipo de asignación utilizado en las fuentes de contaminación, junto con los parámetros básicos y condiciones de borde asumidas para los escenarios. Finalmente, se presentan los resultados de los escenarios de transporte.

#### 6.1.1 Modelización matemática del transporte

Los modelos de transporte están basados en las ecuaciones que describen el flujo de un cuerpo / curso de agua. Por lo general, estos modelos simulan el transporte de un soluto conservativo, sin tener en cuenta las posibles reacciones geoquímicas que ocurren a lo largo de su recorrido. Si, como mecanismos de transporte se consideran la advección, la dispersión hidrodinámica, y una reacción cinética de primer orden, la ecuación general de transporte de una sustancia completamente diluida tiene en cuenta los siguientes términos:

- Término de acumulación o variación de la concentración de contaminante con el tiempo.
- Término de transporte por dispersión, teniendo en cuenta coeficientes de dispersión efectiva.

- Término de transporte por advección.
- Término de transporte reactivo correspondiente a una reacción cinética de primer orden
- Término de fuente o sumidero, donde se contemplan procesos de pérdida o ganancia de componente.

Los principales problemas que se encuentran al intentar resolver las ecuaciones de transporte son:

- La determinación de los coeficientes de dispersión en medios porosos saturados, sobre todo si estos varían con el tiempo y/o la posición.
- La interpretación del transporte de contaminantes a través de medios fracturados, en los que las fracturas actúan como canales de alta velocidad.

La ecuación general que describe el transporte de contaminante en un acuífero es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ D_N \frac{\partial C}{\partial X_i} \right] - \frac{\partial (V_i C)}{\partial X_i} \pm q_s \frac{C_s}{\theta} + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial C_a}{\partial C} - \lambda \left( C + \frac{\rho_b}{\theta} C_a \right) \quad (6-1)$$

Donde:

$\rho_b$  = densidad del suelo o matriz porosa [ML<sup>-3</sup>]

$C_a$  = concentración del contaminante adsorbido en el suelo [MM<sup>-1</sup>]

$\lambda$  = constante de velocidad de reacción de primer orden [t<sup>-1</sup>]

$C$  = Concentración del soluto

$t$  = tiempo

$D_N$  = Coeficiente de dispersión hidrodinámica.

Para la simulación del transporte bajo el entorno Visual Modflow se utilizó el modelo *MT3D* (Mass Transport in 3D) que se acopla directamente con *Modflow*. Este código de transporte fue desarrollado por Chunmiao Zheng en 1990 con apoyo parcial de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). La versión original de *MT3D* (Zheng, 1990) es de dominio público, pero en la actualidad existen otras versiones comerciales las cuales poseen una mayor versatilidad.

En términos generales *MT3D*, al igual que *Modflow*, se basa en una estructura modular que permite simular el transporte de un elemento individual o de un conjunto de elementos. Esta capacidad lo convirtió en un modelo que ha sido ampliamente aceptado por profesionales e investigadores por igual, aplicándose en diferentes estudios en Estados Unidos y en varias partes del mundo. Para la resolución del sistema de ecuaciones de transporte, el código *MT3D* posee un conjunto diverso de métodos. Entre ellos se destacan: el método de las características (*MOC*) (*Konikow et al.*, 1996), el método modificado de las características (*MMOC*), un híbrido de estos dos métodos anteriores (*HMOC*) (*Yeh et al.*, 1993), y el método de diferencias finitas (*FDM*) (*Zeng y Bennett*, 1995). El método de resolución que se escoja dependerá de las condiciones de consistencia, convergencia y estabilidad del proceso numérico. En esta tesis se implementó como método de solución el de diferencias finitas (*FDM*).

## 6.2 Escenarios de transporte propuestos

Como se ha mencionado anteriormente, la existencia del relleno de Navarro data de fines de la década del '60, y recién a partir de 1997 la CVC inicia labores de monitoreo, las cuales se realizan de manera esporádica (*como mínimo se debe realizar una medición por año*). Por tal motivo resulta difícil establecer valores iniciales para la concentración de cloruros en el sector. Ello también impide la posibilidad de realizar una adecuada calibración del modelo de transporte.

En virtud de lo expuesto, el modelo de transporte será de tipo orientativo, brindando la posibilidad de representar la dinámica del sistema ante diferentes situaciones potenciales de fuentes contaminantes. Estas fuentes han sido, efectivamente, identificadas por CVC y en la presente tesis, tras el análisis de los datos hidroquímicos disponibles del sector, se proponen cinco diferentes escenarios, los que se describen a continuación:

- ***Escenario 1: Fuente de contaminación cerro Antiguo y Hospitalario***

En este escenario se consideró como fuente de contaminación a los respectivos cerros *Antiguo* y *Hospitalario* del relleno de Navarro. Tal hipótesis se consideró teniendo en cuenta que las bases de los cerros mencionados no están impermeabilizadas y se encuentran en contacto directo con el sistema acuífero. Para dicho escenario se estableció un período de simulación de 100 años. Se asignó una concentración constante de 524 mg/l,



la cual se estimó en función de los datos medidos de concentración de cloruros en los pozos aledaños a estos dos cerros (*Vc-pm-29*, *Vc-pm-51* y *Vc-pm-54*).

- ***Escenario 2: Fuente de contaminación cerro Antiguo y Hospitalario, con atenuación en 100 años***

Al igual que para el primer escenario se consideraron como fuentes de ingreso de la contaminación al sistema acuífero, las bases de los dos cerros mencionados. El tiempo de simulación escogido fue de 100 años. Sin embargo, en este escenario se consideró una reducción gradual de la concentración, iniciando con una concentración de 524 mg/l en el primer día y finalizando con una concentración de 7 mg/l en el último. En la Tabla 6.1 se pueden observar las variaciones de concentración para cada lapso de tiempo simulado.

**Tabla 6.1 Distribución de concentraciones de cloruro (Cl<sup>-</sup>) - Escenario 2**

Años	Cl <sup>-</sup> (mg/l)
0 - 10	524
10 - 20	320
20 -30	195
30 - 40	119
40 - 50	73
50 - 60	44
60 - 70	27
70 -80	16
80 - 90	10
90 - 100	7

- ***Escenario 3: Fuente de contaminación cerro Antiguo y Hospitalario, con atenuación en 50 años***

Este escenario se plantea con las mismas hipótesis de los dos anteriores. La diferencia radica en la reducción del tiempo de simulación. También se consideraron concentraciones decrecientes cada 10 años, hasta alcanzar los 50 años. Al final del período simulado la concentración de cloruros se iguala a la concentración de fondo que se define en el acuífero para este ión (aproximadamente 7 mg/l). Este escenario persigue ver los efectos de una posible atenuación natural en el medio, considerando que los cerros producirán lixiviados por 50 años. En la Tabla 6.2 se presenta la distribución de las concentraciones de cloruro en los diferentes intervalos de tiempo considerados.

**Tabla 6.2 Distribución de concentraciones de cloruro (Cl) - Escenario 3**

Años	Cl (mg/l)
0 - 10	524
10 - 20	304
20 -30	137
30 - 40	62
40 - 50	22
50 - 100	7

• **Escenario 4: Fuente de contaminación cerro Antiguo, hospitalario y Madre Vieja**

Como se ha ido mencionando en la presente tesis y en diferentes informes de CVC (Azcuntar, 2000; CVC, 2001; CVC, 2004)) el sector de la *Madre Vieja*, que se encuentra junto al relleno sanitario, debido a su cercanía y situación topográfica, es un sector en el cual se almacena el lixiviado, que escurre tanto de manera superficial como subterránea. Este hecho se puede confirmar con los resultados de los análisis químicos del agua de dicho cuerpo, en donde los diferentes muestreos hechos por la CVC revelan valores elevados de todos los elementos analizados. En el caso del cloruro, sobre la *Madre Vieja* se asignó un valor de 1470 mg/l, el cual corresponde al valor medio de las concentraciones observadas en este paleocauce. La concentración se asumió constante y, al igual que en los cerros, se consideró su permanencia por 100 años.

• **Escenario 5: Fuente de contaminación cerro Antiguo, Hospitalario y Lagunas**

Como escenario final, se planteó una posible fuga de lixiviados acumulados en las lagunas de almacenamiento adjuntas al relleno de Navarro. Para ello se seleccionaron dos lagunas, asignándoles una concentración de Cl de 2200 mg/l. A los fines de la simulación del escenario, su detección ocurre desde el año 30 y persiste hasta el año 100 del lapso simulado. Los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*, con una concentración constante 524 mg/l, forman parte de este escenario.

### 6.3 Parámetros básicos y condiciones de borde para el transporte

Una de las principales razones para simular el destino y transporte de solutos en un curso / cuerpo de agua es analizar el papel de la misma como transmisor-propagador y controlador de una sustancia contaminante. La comprensión de estos procesos y la predicción de la

evolución espacio-temporal de esta sustancia permitirán evaluar la posibilidad de tomar medidas de mitigación y/o control de la calidad del cuerpo receptor.

En lo que se refiere al transporte de solutos en un medio poroso saturado, los principales procesos son la *advección*, la *dispersión hidrodinámica*, y los procesos de transferencia física, química o biológica (*reacciones*). Los dos primeros fueron los considerados en la presente tesis de maestría. El transporte reactivo no fue considerado debido a la naturaleza de trazador seleccionado.

Algunas generalidades de los dos procesos considerados para el modelo transporte son:

- El termino ***advección*** hace referencia al movimiento ideal de un soluto que es transportado a la misma velocidad que el flujo. En este caso la sustancia se desplaza en un frente de igual velocidad que la velocidad media de desplazamiento del flujo (*velocidad macroscópica*) y se puede considerar como un “*flujo pistón*”. Ello significa que, si el único proceso a considerar es el advectivo, una masa añadida a un tubo de corriente permanecerá siempre dentro de ese tubo. Para ello es necesario conocer la red de flujo del sistema. En general se considera que éste es el proceso dominante en el transporte del medio saturado (Fetter, 1999).
- Por su parte la ***dispersión hidrodinámica*** o dispersión en sentido amplio se refiere a la parte de desplazamiento de sustancia que se aleja de la idealidad que supone el flujo advectivo. Considera, por tanto, aquella parte del flujo de sustancia cuya velocidad de desplazamiento es diferente de la media de flujo acuoso, mayor o menor, dando lugar al paso de la sustancia en el fluido en forma de nube (Fetter, 1999). En general la dispersión es un proceso de ocurrencia y evolución de una zona de transición entre dos dominios en fase fluida, con diferente composición. La dispersión hidrodinámica puede, a su vez, subdividirse atendiendo a los mecanismos con los que se relaciona, en dispersión mecánica y difusión molecular.
- Atendiendo a criterios espaciales, la desviación del flujo que se desarrolla en la dirección principal del flujo se denomina habitualmente ***dispersión longitudinal*** (Freeze y Cherry, 1979). La desviación del flujo que se desarrolla perpendicularmente a dicha dirección se denomina ***dispersión transversal***.

Normalmente la dispersión longitudinal es muy superior a la transversal, lo que hace que la pluma de la sustancia considerada evolucione en forma de nube o penacho alargada en el sentido principal del escurrimiento. No obstante, a velocidades muy bajas, cuando la difusión es el mecanismo de dispersión dominante, la dispersión longitudinal y transversal tienden a igualarse y la nube adquiere un aspecto circular (Fetter, 1999).

### 6.3.1 Asignación de dispersividad

Como se mencionó en la introducción del capítulo, uno de los principales problemas que se encuentran al intentar resolver la ecuación de transporte es la determinación de los coeficientes de dispersión. Este coeficiente está compuesto por dos términos: la dispersión mecánica y la difusión molecular. Su expresión, para la componente longitudinal del flujo, es:

$$D_x = \alpha_x u_x + D^* \quad (6-2)$$

Donde:

$D_x$  es el coeficiente de dispersión hidrodinámica [ $L^2/T$ ],

$\alpha_x$  es la dispersividad [L],

$u_x$  es la velocidad real del flujo [L/T],

$D^*$  es el coeficiente de difusión molecular [ $L^2/T$ ].

De los parámetros de la ecuación (6-2) el que requiere especial atención es la dispersividad. Esta representa la extensión de un contaminante a lo largo de la dirección preferencial del flujo. En función a resultados experimentales se sabe que, al aumentar la escala de la pluma o del sistema estudiado, se incrementa la dispersividad. Por tanto este parámetro es dependiente de la escala (Gelhar, *et al.*, 1992).

Existen varios métodos de estimación de la **dispersividad longitudinal** ( $\alpha_L$ ). Sin duda el método más fiable es la determinación en campo, por medio de ensayos con trazadores; en su defecto, ensayos de laboratorio. Sin embargo en el sector del relleno de Navarro no se han llevado a cabo dicho ensayos. Por lo tanto, para la estimación de la dispersividad se utilizó la expresión propuesta por Xu y Eckstein (1995) quienes trabajaron con los mismos datos publicados por Gelhar *et al.* (1992) pero independizándose de la clasificación de confiabilidad del dato que estos últimos autores habían establecido. Ellos realizaron un

análisis de regresión considerando, con el mismo grado de confiabilidad, a todos los datos y obtuvieron la siguiente relación (6-3) para estimar la dispersividad:

$$\alpha_L = 0.83 (\log_{10} L_p)^{2.414} \quad (6-3)$$

Donde ( $L_p$ ) es la longitud de la pluma (m).

De acuerdo a evaluaciones preliminares hechas por CVC (Azcuntar, 2000) la pluma de contaminación de Navarro alcanza una longitud de unos 1100 m. Al aplicar esta longitud a la ecuación (6-3) se obtiene un valor de dispersividad  $\alpha_L = 12 m$ .

Del mismo modo que con la dispersividad longitudinal, es necesario estimar las dispersividades transversal ( $\alpha_T$ ) y vertical ( $\alpha_V$ ). En la literatura especializada se presentan varias relaciones que estiman ambas dispersividades en función de la dispersividad longitudinal. En este caso particular se ha optado por las siguientes relaciones (Gelhar *et al.*, 1992):

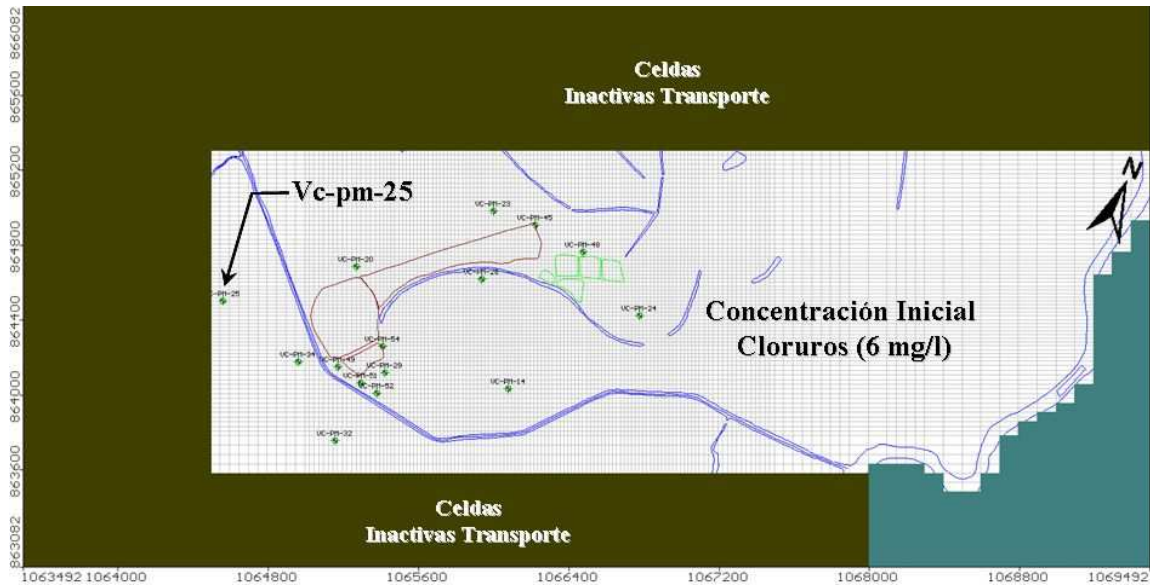
- Dispersividad longitudinal,  $\alpha_L = 12 m$
- Dispersividad horizontal,  $\alpha_T = 0.1 \alpha_L$
- Dispersividad vertical,  $\alpha_V = 0.01 \alpha_L$

### 6.3.2 Introducción de parámetros al modelo de transporte

Una vez establecidos los valores de dispersividad, los mismos se ingresaron a Visual Modflow junto con los otros parámetros básicos que se solicitan para la simulación del transporte.

Con el propósito de optimizar el tiempo de simulación del transporte se inactivaron una serie de celdas (Figura 6.1). La concentración inicial de cloruros asignada es de 6 mg/l para todo el dominio de transporte. Su valor se escogió en función del tenor observado para este ión en pozos que se encuentran aguas arriba del relleno de Navarro.

Igualmente en esta fase del modelo, se asignaron los valores de la dispersividad:

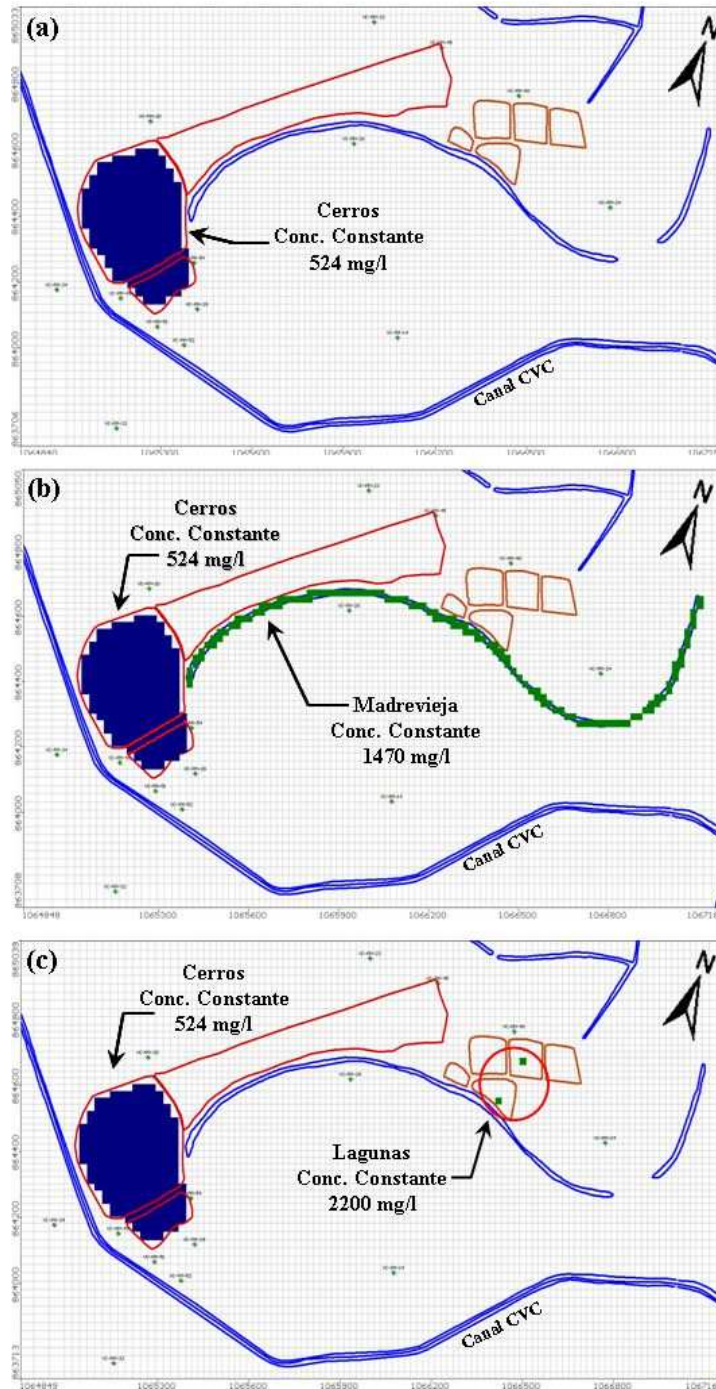


**Figura 6.1** Asignación de concentración inicial y celdas inactivas para el transporte

#### 6.4 Asignación de fuentes de contaminación

Para la asignación de las fuentes de contaminación del área de estudio se utilizó la condición de borde de transporte de concentración constante. La Figura 6.2(a) presenta las celdas que fueron asignadas como fuentes de contaminación en los escenarios 1, 2 y 3. Dichas celdas corresponden a los cerros Antiguo y Hospitalario. Por otro lado, la Figura 6.2(b) muestra las celdas asignadas con la concentración correspondiente a la *Madrevieja* para el escenario 4. Por último, en la Figura 6.2(c) se puede observar la ubicación de las dos lagunas contempladas en el escenario 5.





**Figura 6.2 Fuentes de concentración de escenarios de transporte**

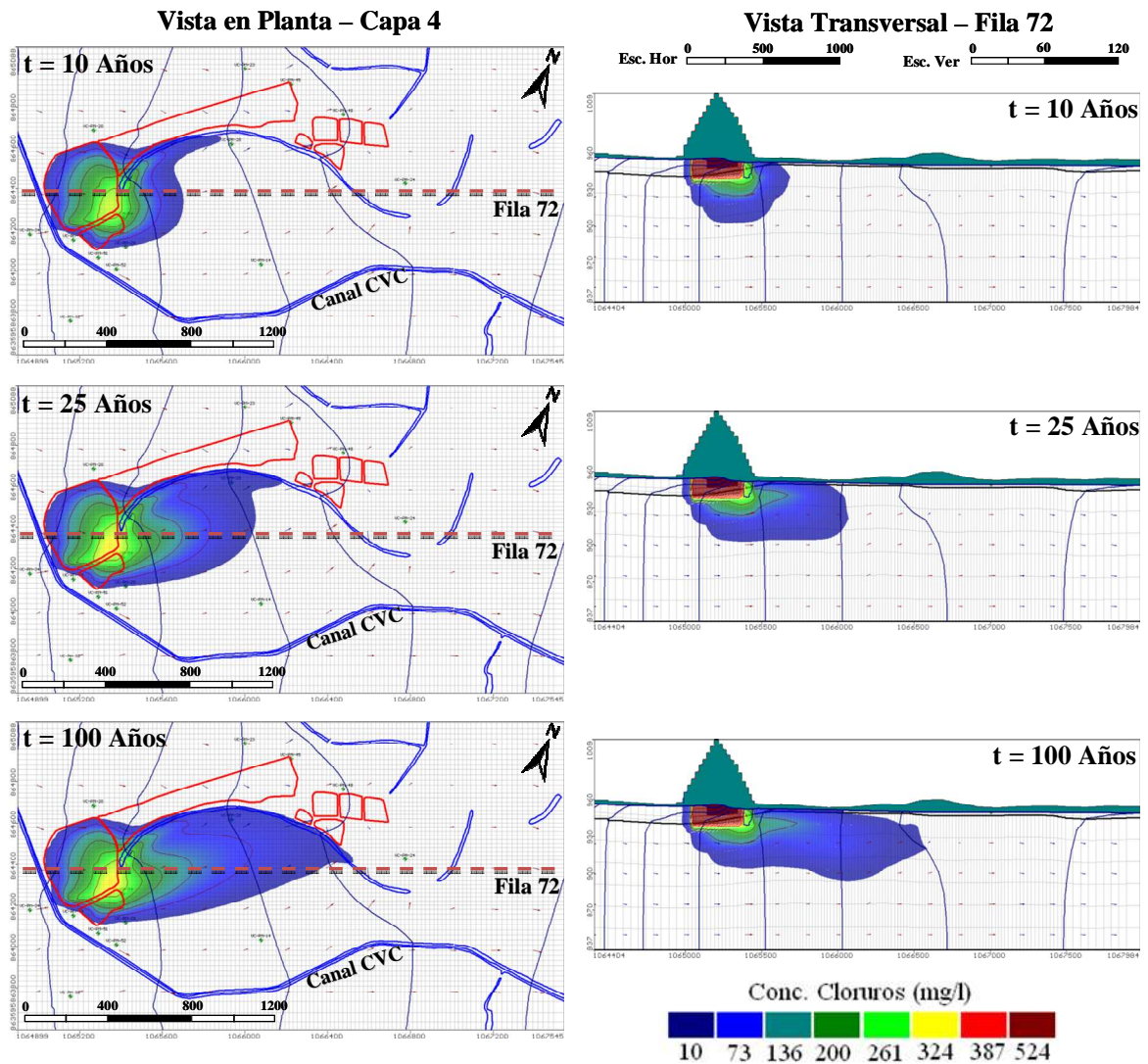
### 6.5 Resultados del modelo de transporte

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios planteados en tres diferentes tiempos. La concentración mínima de cloruros para definir el límite de la pluma de contaminación fue de 10 mg/l. Estos resultados fueron incorporados al SIG anexo al presente trabajo de tesis.

### 6.5.1 Resultados del Escenario 1

En la Figura 6.3 se presenta la extensión de la pluma de cloruro originada desde las bases de los cerros *Antiguo* y *Hospitalarios* considerando un ingreso de concentración constante, para los periodos de tiempo de  $t = 10$  años, 25 años y 100 años. La vista en planta representa la pluma generada a una profundidad promedio de 20 m. En este caso, las concentraciones máximas, se dan cerca de las bases de los cerros, y varían desde 261 mg/l para  $t = 25$  años, hasta 327 mg/l en los últimos 100 años. En cuanto al avance de la pluma se observa que, en el sector de la *Madrevieja*, se produce un frente de avance preferencial para los primeros años de simulación ( $t = 10$  años). Esto estaría indicando el importante papel de este paleocauce en la propagación de una posible pluma en el sector.

La vista en corte presenta la evolución de la pluma en una sección transversal del dominio que atraviesa los cerros *Antiguo* y *Hospitalarios* (fila 72). En ella se observa que las mayores concentraciones (524 mg/l) se localizan aproximadamente a una profundidad de 10 m de la base de ambos rellenos. Para  $t = 25$  años, la profundidad máxima de la pluma es de unos 50 m, en donde la concentración es de 10 mg/l. Lateralmente la pluma se desplaza alrededor de unos 1200 m desde la base de los cerros hasta el sector de la lagunas de lixiviados. Para este escenario es evidente que la pluma generada afecta a la *Madrevieja*, pero no alcanza de manera directa al río Cauca.

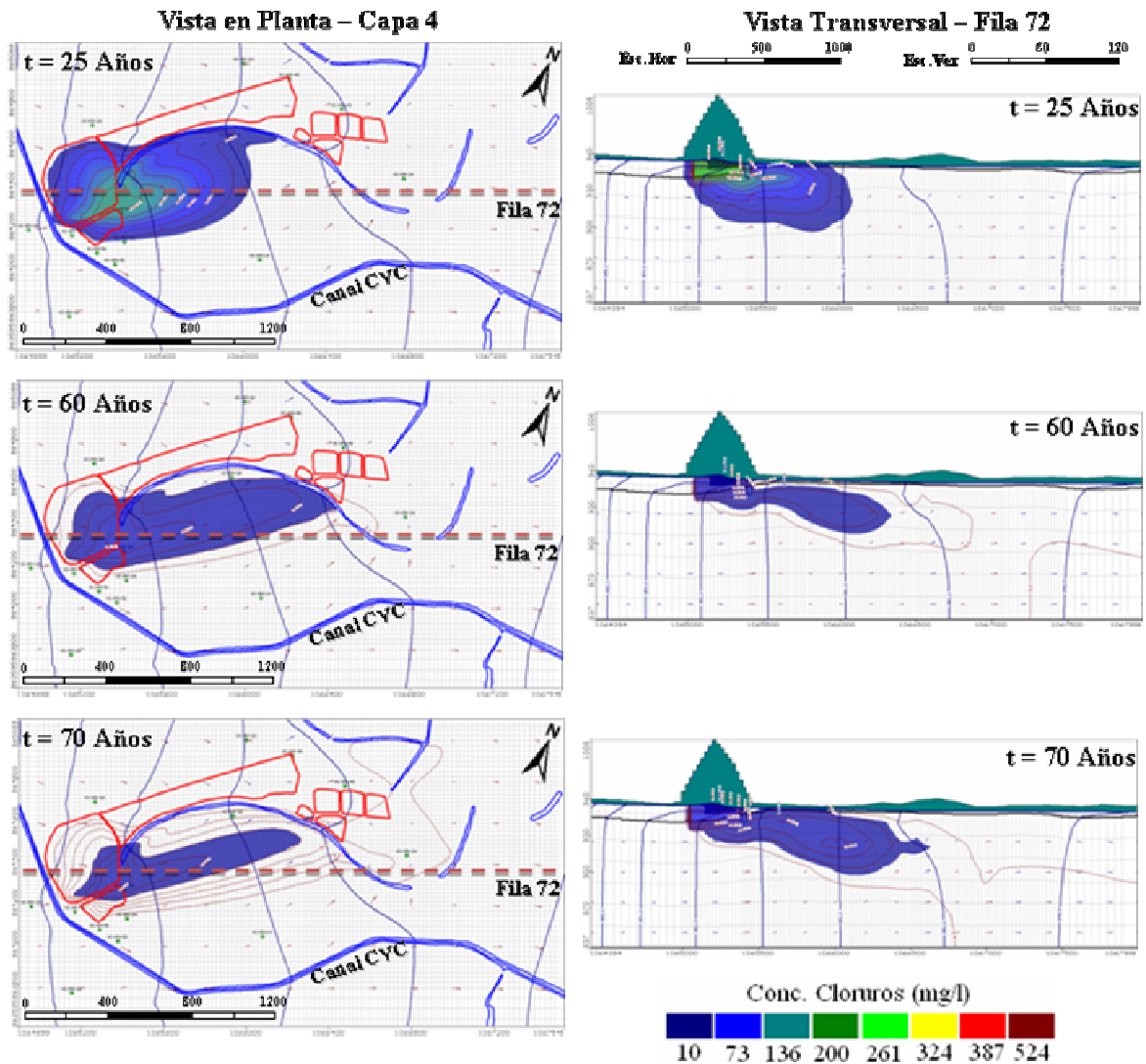


**Figura 6.3** Pluma de concentración de cloruros - Escenario 1 (Concentración constante: Cerros Antiguos y Hospitalario)

### 6.5.2 Resultados del Escenario 2

La Figura 6.4 presenta los resultados del escenario 2 para los años 25, 60 y 70. En este escenario se consideró una variación gradual de la concentración en las respectivas fuentes. La extensión espacial de la pluma es similar a la obtenida para el primer escenario. Sin embargo, en este caso y para los primeros 25 años, la concentración máxima en la base de los cerros es de 136 mg/l. A partir de los 60 años, se aprecia una notable reducción en la concentración y extensión de la pluma, presentando un tenor de 25 mg/l en la base de los cerros. Después de los 70 años el área afectada es aún menor, y la concentración promedio alcanza los 12 mg/l.

En cuanto a su comportamiento en profundidad, se observa que la pluma alcanza -al igual que el escenario anterior- una profundidad máxima de 50 m, en donde las concentraciones se encuentran alrededor de los 15mg/l para un  $t = 25$  años. También se observa una reducción en profundidad de la pluma la cual, en la base de los cerros, es de 33 m. Longitudinalmente, y para un tiempo de simulación igual a 60 años, la pluma se propaga 1300 m aguas abajo.



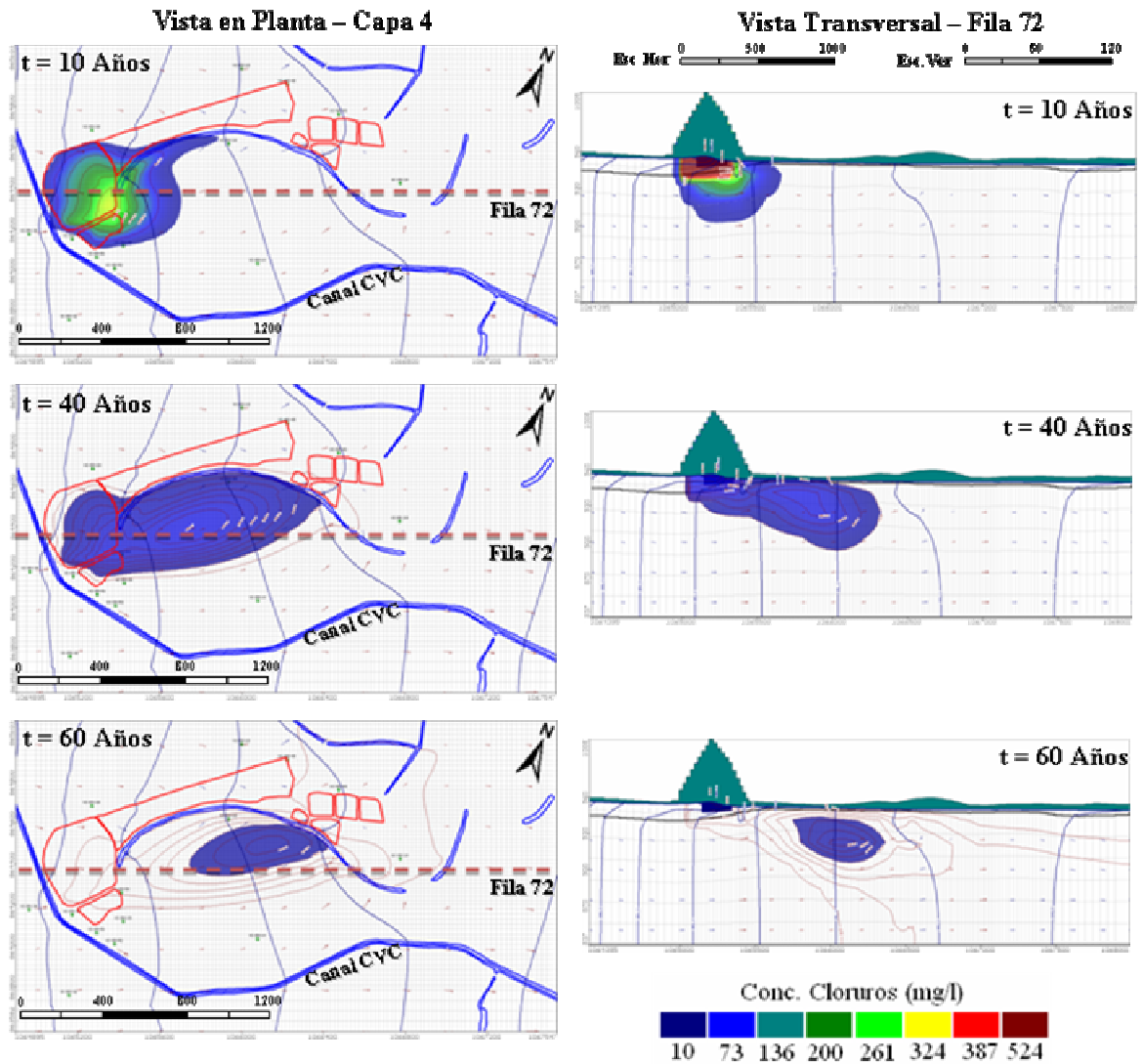
**Figura 6.4** Pluma de concentración de cloruros - Escenario 2 (Atenuación natural en 100 Años: cerros Antiguo y Hospitalarios)

### 6.5.3 Resultados del Escenario 3

La Figura 6.5 presenta los resultados del escenario 3, en el cual se consideró no solo una reducción del ingreso de la fuente sino también una disminución del período de simulación. Los resultados mostrados corresponden a los tiempos de 10, 40 y 60 años, una profundidad promedio de 20 m (capa 4) y sección transversal en la fila 72. Para este escenario la pluma se comporta de manera similar a los escenarios anteriores. En los primeros 10 años se observa un desplazamiento preferencial hacia la *Madrevieja*, en donde la concentración alcanza 250 mg/l. Luego de los 40 años de simulación, la pluma alcanza su máxima extensión en superficie, y una concentración promedio de 30 mg/l. Finalmente, después de 60 años, en donde ya no se registra ingreso de fuente contaminante, se evidencia el desplazamiento de una pluma residual, con una concentración promedio de 12 mg/l.

En la vista transversal ( Figura 6.5) se observa el desplazamiento longitudinal de la pluma. Se destaca que en los primeros años de simulación, la pluma alcanza su máxima profundidad (aproximadamente 50 m) respecto a las bases de los cerros. Para un  $t = 40$  años ésta se desplaza lateralmente unos 840 m y alcanza una profundidad máxima de 63 m. Los efectos de la pluma de cloruros producida por los cerros resultan evidentes hasta los 60 años, en donde la concentración promedio es de 16 mg/l y se encuentra a 900 m aguas abajo de la base de los cerros y a 35 m de profundidad. Finalmente, para los siguientes años simulados esta pluma es atenuada totalmente.





**Figura 6.5** Pluma de concentración de cloruros - Escenario 3 (Atenuación natural en 50 Años: cerros Antiguo y Hospitalario)

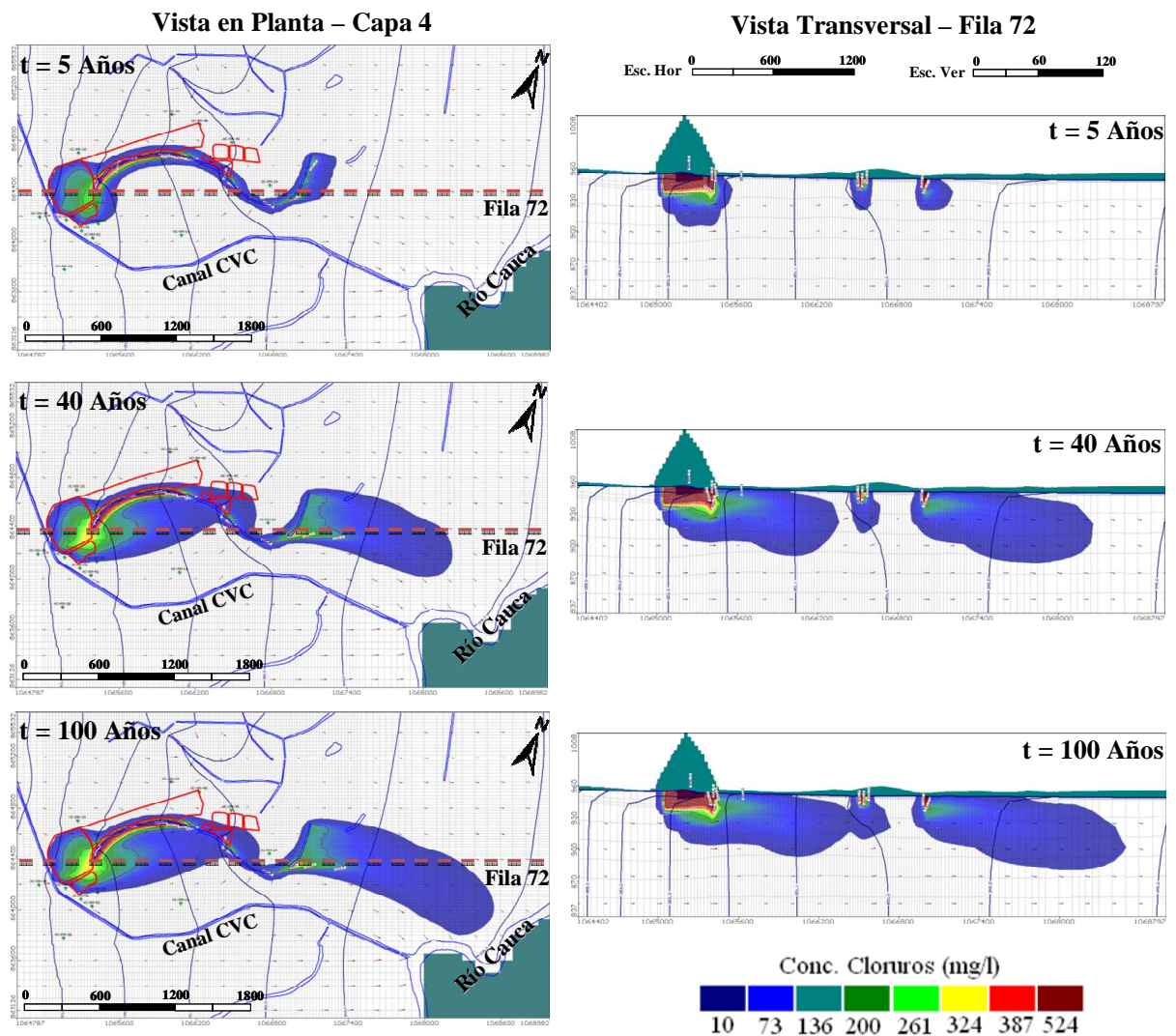
#### 6.5.4 Resultados del Escenario 4

Este escenario es el que contempla la incorporación de una nueva fuente de contaminación al sistema: la carga que se aporta a través de la *Madrevieja*. La Figura 6.6 presenta los resultados de la simulación del transporte para 5, 40 y 100 años. Para un  $t = 5$  años, y para la capa 4 del modelo, las mayores concentraciones (500 mg/l) se presentan en el sector de la *Madrevieja*. En este caso la pluma producida desde el relleno de Navarro se extiende longitudinalmente unos 2100 m. Para un  $t = 40$  años la vista en planta (capa 4) permite identificar la generación de dos plumas de cloruros: la primera de ellas se origina en la base de los respectivos cerros *Antiguo* y *Hospitalario*; la segunda pluma se origina en el



sector *Este* de la *Madrevieja* aledaña al relleno de Navarro, y la cual, en función del sistema de flujo, se dirige hacia las inmediaciones del río Cauca.

Al terminar los 100 años de simulación se aprecia una pluma, cuya longitud proyectada sobre la capa 4, alcanza una longitud de 3370 m (Figura 6.6). Sin embargo, se pudo comprobar que, en la capa 5 (a unos 35 m de profundidad) y para un  $t = 60$  años, la pluma de cloruros proveniente del relleno, descarga sobre el río Cauca con una concentración de 10mg/l. La vista de la sección transversal (fila 72) permite considerar una profundidad máxima de esta pluma de 76 m y una longitud de 2700 m desde los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*.

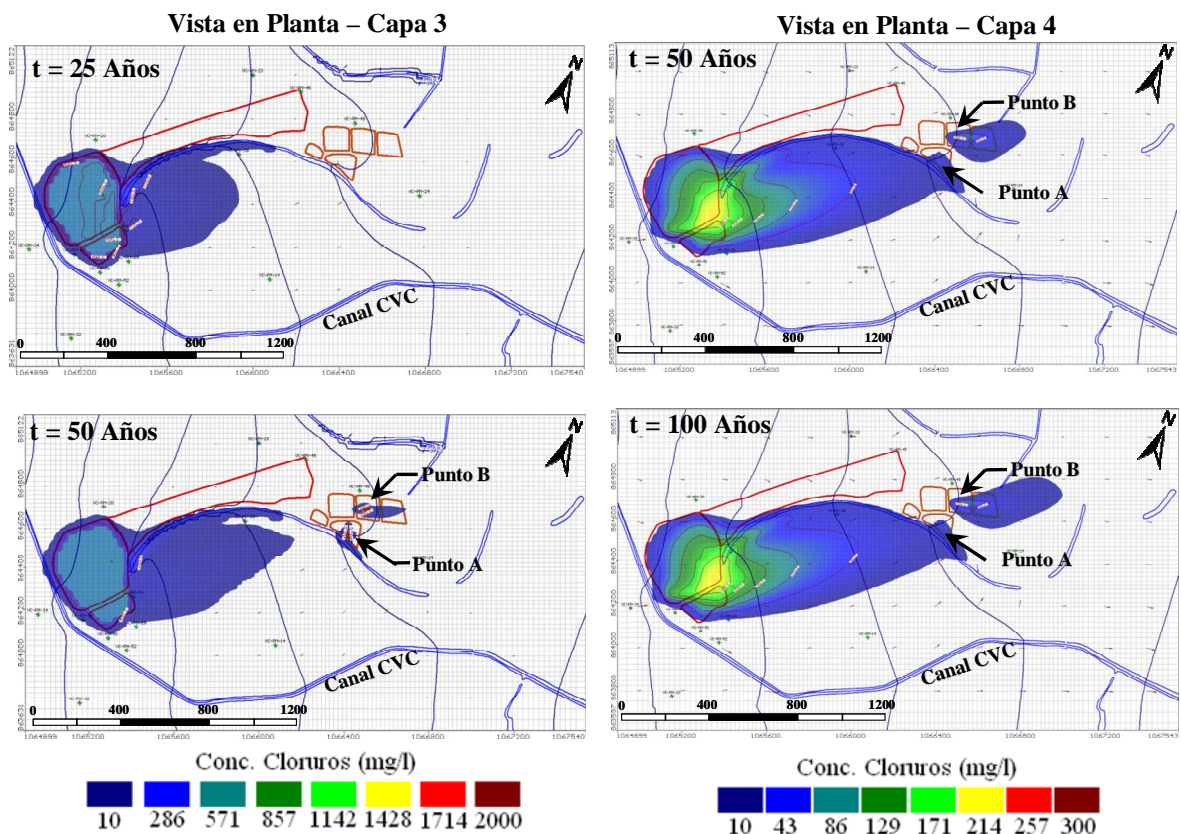


**Figura 6.6** Pluma de concentración de cloruros - Escenario 4 (Fuentes contaminantes: Cerros Antiguo, Hospitalario y Madrevieja – hasta 100 Años)

### 6.5.5 Resultados del Escenario 5

Para el último escenario simulado se consideró, además, una posible fuga producida desde la base de las lagunas de almacenamiento de lixiviado (*puntos A y B*), la que tiene lugar a partir del año 30. En la Figura 6.7 se presentan los resultados obtenidos en la capa 3 para los tiempos de simulación de 25 y 50 años; y en la capa 4 para 50 y 100 años. En el caso de la capa 3 se observa el comportamiento diferencial de la pluma hacia la *Madrevieja*. A su vez, para  $t = 50$  años, se puede observar la generación de dos plumas a partir de las lagunas. Una de ellas (*Punto A*) descarga en la *Madrevieja* indicando, nuevamente, la importancia de dicho sector como vía preferencial de propagación.

Para el caso de la capa 4 se observa que, a partir del año 50, la pluma generada desde los cerros se une a la pluma originada desde una de las lagunas (*Punto A*). Mientras que, la pluma con origen en el punto B adquiere dirección *Este* con una longitud máxima de 530 m y una profundidad de 35 m, para un tiempo de simulación de 100 años.



**Figura 6.7** Pluma de concentración de cloruros - Escenario 5 (Fuentes contaminantes: Cerros Antiguo, Hospitalario y Lagunas – hasta 100 Años)

## 6.6 Propuesta de ampliación de red de pozos de monitoreo

En función del análisis de los antecedentes y de los resultados alcanzados con los distintos escenarios planteados en el modelo de transporte, se evidencia la posibilidad concreta que los lixiviados generados en los cerros ya clausurados del Relleno Sanitario de Navarro estén deteriorando la calidad del agua subterránea del área circundante y que la pluma generada alcance su punto de descarga en el Río Cauca (principal fuente de abastecimiento de agua a la ciudad de Cali). Por lo tanto, resulta imperioso contar con una red de monitoreo que permita, de acuerdo a Foster *et al.*, (2003):

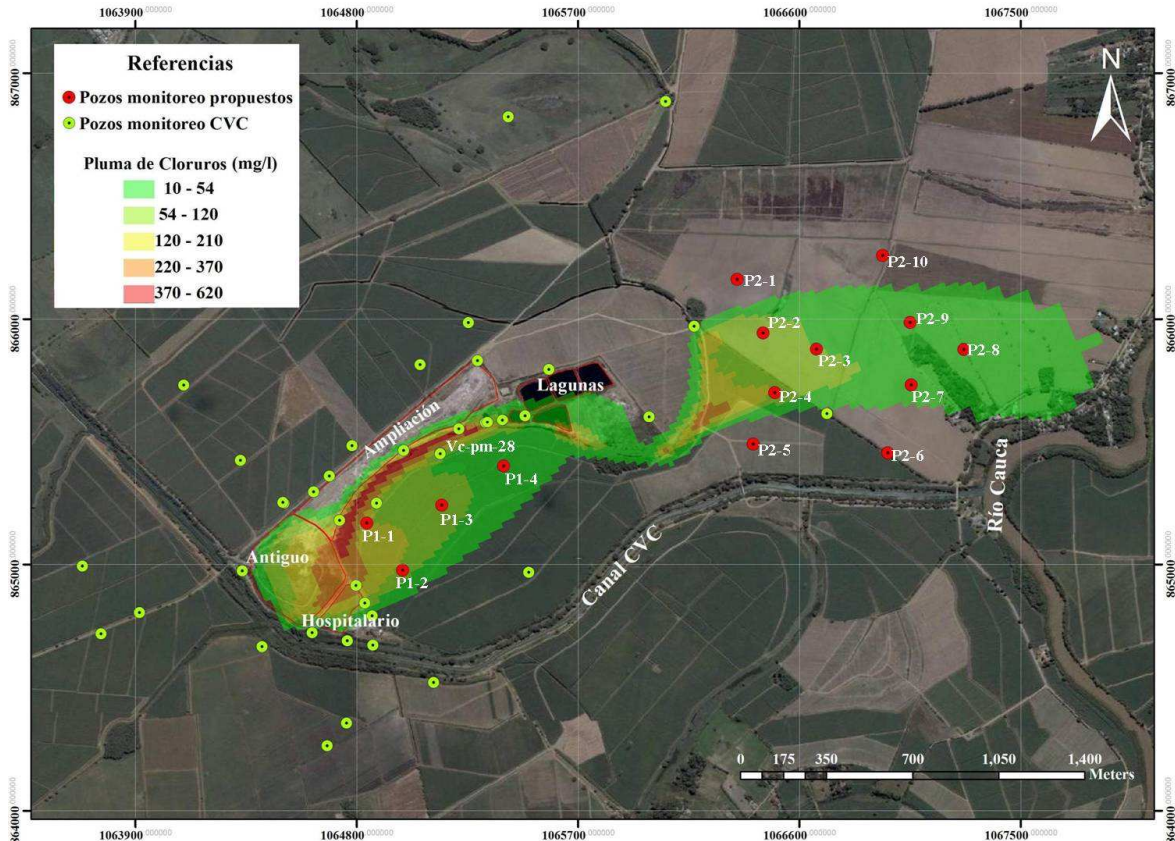
- Confirmar la efectividad de los procesos naturales de atenuación de contaminantes, donde éstos sean considerados, como la manera más económica o la única forma posible de manejar la contaminación del acuífero.
- Confirmar la efectividad de las medidas ingenieriles de remediación tomadas para limpiar o contener la contaminación del acuífero, donde éstas hayan sido consideradas técnica y económicamente factibles.

Para evaluar la funcionalidad de la actual red de pozos de monitoreo de la CVC se seleccionó, de entre los escenarios planteados, aquel considerado más crítico (escenario 4). En este escenario fue evidente el destino final de la pluma de cloruros (descarga en el río Cauca). Dado que, las simulaciones del transporte indicaron que la pluma posee un gran alcance en profundidad, localizándose a 50 m en las cercanías de los cerros y a 30 m en su frente de avance, se considera conveniente aumentar la profundidad de los pozos de monitoreo existentes. La mayoría de ellos presenta, en la actualidad, una profundidad promedio que no sobrepasa los 12 m. La principal consecuencia de esta geometría es la no detección de los elementos de interés en los pozos en donde la pluma se localiza a mayor profundidad. Un ejemplo claro de este tipo de situación es el pozo Vc-pm-28 (ver Figura 6.8) que posee una profundidad de 8 m.

La Figura 6.8 presenta la localización de los pozos existentes de la red de monitoreo de la CVC, y los pozos sugeridos en función de los resultados obtenidos. Concretamente, se propone la instalación de 4 pozos (P1-1, P1-2, P1-3 y P1-4) en la dirección *Norte-Este*, en la cercanía de los cerros Antiguo y Hospitalario, con una profundidad de entre 20 y 50 m. Asimismo, y con el objetivo de monitorear la posible migración de la pluma hacia el río



Cauca, se propone la instalación de 10 pozos sobre el sector *Este* del relleno (P2-1, P2-2, P2-3, P2-4, P2-5, P2-6, P2-7, P2-8 y P2-10) entre las lagunas y el río Cauca, con una profundidad no inferior a los 50 m.



**Figura 6.8** Localización de pozos de monitoreo existente y propuestos para pluma de contaminación generada desde Navarro

La propuesta de esta red complementaria se basa en los resultados obtenidos con los escenarios de flujo y transporte simulados, planteados en función de la información disponible.

En el Anexo 7 se presentan las coordenadas de localización de los diferentes pozos propuestos.

## Capítulo 7: Evaluación de alternativas de remediación

### 7.1 Objetivos de la remediación

Las tecnologías de recuperación o descontaminación de acuíferos, y las medidas de contención de la contaminación, pueden considerarse como la última solución, una vez que las medidas de prevención y control adecuadas han fallado o no han sido puesta en práctica (Ribera, 2009).

Debido a la baja capacidad de dispersión y degradación de un contaminante en un acuífero y, generalmente, a la baja tasa de renovación del agua subterránea, la opción de una atenuación natural del efecto de dichos contaminantes no puede considerarse como una alternativa que ofrezca una alta seguridad (Ribera, 2009). Esto es muy cierto cuando se trata de contaminantes no biodegradables, plaguicidas, cloruros y metales pesados. También con la presencia de un elemento cuyo comportamiento en el medio subterráneo sea poco conocido o con aquellos que, aún en pequeñas cantidades, sean tóxicos, Por lo tanto se hace necesario la implementación de algún tipo de alternativa de remediación que contribuya o permita descontaminar al acuífero.

Las alternativas de remediación se definen como aquellos dispositivos o metodologías encaminadas a la limpieza del acuífero, hasta niveles no peligrosos para la salud o hasta la adecuación a una determinada normativa u objetivo de calidad del agua subterránea. La selección de una alternativa de remediación para un sitio contaminado con los lixiviados generados en un relleno sanitario requiere, además del conocimiento de la tecnología de remediación, un estudio detallado del medio receptor, una investigación en relación a aspectos constructivos, historial de manejo y una evaluación de los riesgos de dicho relleno con el entorno. Estos estudios previos permiten definir las posibilidades técnicas y económicas más adecuadas para disminuir el impacto (IHOBE, 2000).

Por lo tanto, la selección de alternativas de remediación es una cuestión interdisciplinaria, de especialistas y requiere un alto nivel de conocimiento y una gran cantidad de criterios que escapan a los objetivos planteados en esta tesis de maestría, pero que sin duda resultan

sumamente interesantes para plantear futuras investigaciones. No obstante, se ha considerado pertinente presentar en este capítulo, de manera general, tres alternativas técnicas para la remediación de sitios contaminados las que fueron simuladas con Visual Modflow. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las alternativas propuestas.

## 7.2 Alternativa 1: Sistemas de pozos de bombeo

Este tipo de alternativa de remediación se clasifica como de tipo “*barrera hidráulica*”. Consiste en la instalación de un pozo o una batería de pozos de modo que el bombeo o la inyección practicada modifique los gradientes y, por ende, la dirección del escurrimiento. El caso más simple corresponde a la puesta en funcionamiento de un pozo, con un caudal determinado, que asegure que la totalidad de la pluma contaminante pueda ser captada por el régimen de flujo generado.

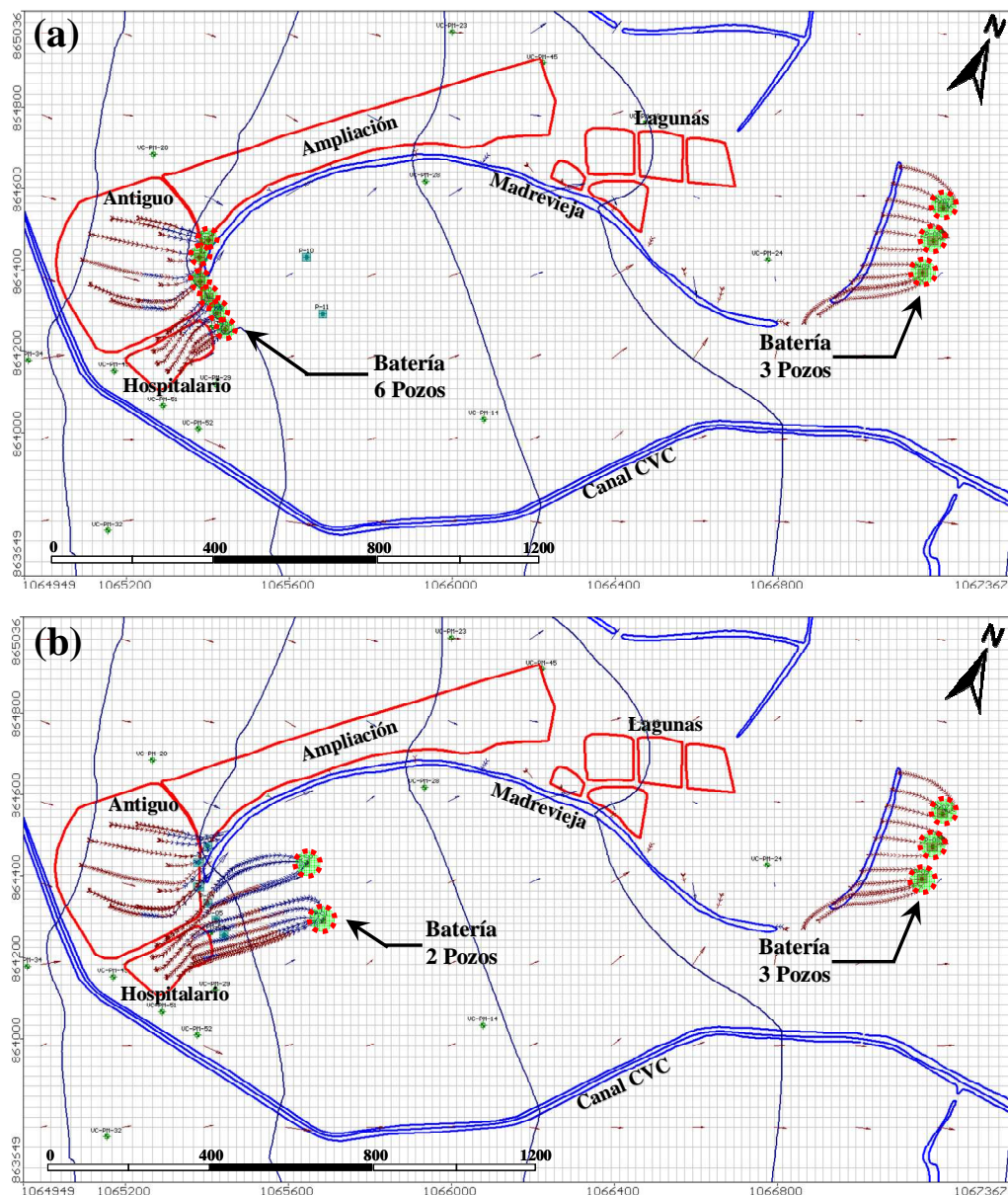
Si la contaminación en el acuífero es muy extensa, como lo demuestran los resultados alcanzados en este estudio, es aconsejable diseñar una barrera hidráulica con varios pozos. Estos se deberían disponer de modo de interceptar el mayor número posible de líneas de flujo de agua subterránea. Algunos autores consideran que la disposición con la cual se logran resultados aceptables es una disposición geométrica regular de pozos: en línea, círculo o rectángulo (Custodio y Llamas, 1996; Fetter, 1999).

En el caso particular de Navarro, y para analizar este tipo de alternativa, se utilizó la trayectoria de las partículas obtenida en el ítem 5.9.2 “*Seguimiento de partículas*” del Capítulo 5. La alternativa de remediación “*barrera hidráulica*” se implementó con Visual Modflow. Los pozos de captura fueron ingresados considerando dos posibles disposiciones, de modo de encontrar la opción más eficiente.

En la Figura 7.1(a) se presenta la primera configuración implementada: una batería de 6 pozos ubicados entre la base de los cerros *Antiguo* y *Hospitalarios* y la *Madrevieja*. Cada uno de estos pozos extrae del sistema acuífero un caudal de 60 m<sup>3</sup>/día. También en esta opción se consideró la disposición de una segunda batería compuesta por 3 pozos que bombean un caudal de 63 m<sup>3</sup>/día. Los mismos se ubicaron hacia el sector *Este* de la *Madrevieja*. Como se observa en la figura, ambas baterías captan la totalidad de las partículas asignadas tanto en los cerros como en la *Madrevieja*.



La Figura 7.1(b) muestra la implementación de la segunda opción, que consiste en adicionar a la anterior, y en un sector intermedio, 2 nuevos pozos de bombeo, con un caudal de explotación para cada uno de 250 m<sup>3</sup>/día. Si bien estos dos nuevos pozos capturan parte de la pluma generada desde los cerros (*ver Escenario N° 1 – Simulación del transporte*) se observa que no todas las partículas con origen en el cerro Antiguo son capturadas por estos pozos, sino que algunas descargan en la *Madrevieja*. De acuerdo con los resultados obtenidos en los escenarios de transporte implementados en el Capítulo 6, el sector de la *Madrevieja* constituye una vía preferencial de escurrimiento, y por ende, de avance y propagación de un soluto.



**Figura 7.1** Alternativas de pozos de bombeo (a) Batería 6 pozos base de cerros, Batería 3 pozos, (b) Batería 2 pozos zona intermedia, Batería 3 pozos

De estas dos opciones analizadas, la alternativa (a) resulta la más adecuada con una captación total de las partículas asignadas y un caudal total de operación de 550 m<sup>3</sup>/día.

### 7.3 Alternativa 2: Sistema de zanja interceptora

La segunda alternativa de remediación que se implementa es la de una zanja interceptora (*dren*), la que también se clasifica como un método de tipo “*barrera hidráulica*”. En este caso se construye una zanja o canal con el fin de drenar y capturar la pluma contaminante. El agua que es acumulada en la zanja debe ser retirada por bombeo para su posterior tratamiento. Ocasionalmente, en este tipo de sistema se puede adicionar otra medida de remediación como lo puede ser la aireación del agua.

Este tipo de técnica es bien conocida y se encuentra bastante documentada (IHOBE, 2000). Es aplicable a cualquier tipo de contaminación y distribución de residuos. Para la implementación de esta alternativa, en Visual Modflow, se utilizó la condición de borde tipo “*Dren*”.

Básicamente, el objetivo perseguido en este prediseño es determinar una longitud óptima de dren de forma de interceptar la mayor cantidad posible de partículas contaminantes. Las mismas fueron asignadas en los cerros y *Madrevieja*. También se pudo determinar la tasa de flujo entrante a la zanja a través del balance de masas. Se considera que éste es un valor importante para el diseño de un posible sistema de tratamiento posterior.

En la Figura 7.2(a) se observa la localización de las dos zanjas propuestas para la intercepción de partículas. La primera fue asignada entre la base de los cerros y la *Madrevieja*, con una longitud de 260 m. El balance de masas en esta zona indica una tasa de flujo de 850 m<sup>3</sup>/día. Por otro lado, para la intercepción adecuada de las partículas que salen desde la *Madrevieja* (sector *Este*), se asignó una zanja con una longitud de 320 m. El balance de masas indica un caudal de 1047 m<sup>3</sup>/día, lo que hace un total para la alternativa de 1897 m<sup>3</sup>/día. La profundidad aproximada de estas zanjas es de 6 m.

En la Figura 7.2(b) se muestra una vista transversal (sobre la fila 72) de la eficiencia de la alternativa propuesta. En ella se puede apreciar cómo las partículas son capturadas por ambas zanjas.

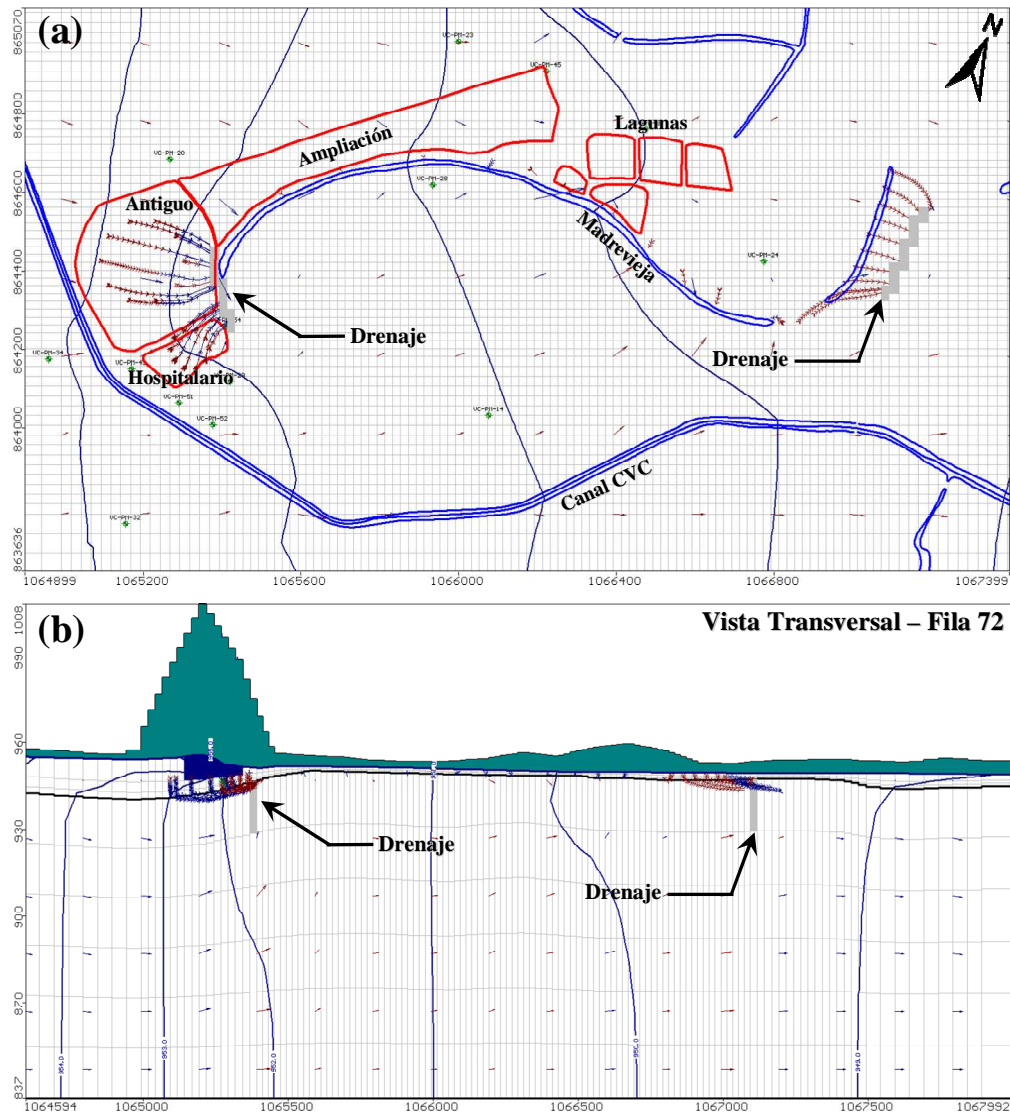
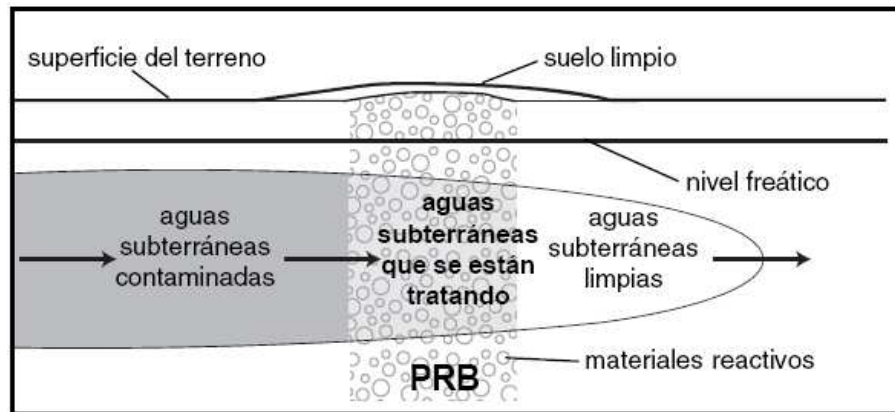


Figura 7.2 Zanjas interceptoras

#### 7.4 Alternativa 3: Barreras impermeables con compuerta geoquímica

La tercera alternativa evaluada es la implementación de una barrera impermeable con compuerta geoquímica. Esta técnica es conocida típicamente como “PRB” por sus siglas en inglés. Consiste en la construcción de una pantalla impermeable vertical utilizada para desviar el agua contaminada hacia la zona de la compuerta geoquímica. Esta compuerta es un dispositivo que permite el paso del agua pero crea unas condiciones químicas tales que reduce el paso de contaminantes. La compuerta puede funcionar favoreciendo variaciones en el estado redox o en el pH. Los materiales *reactivos* de la compuerta atrapan las sustancias químicas dañinas o las transforman en sustancias inofensivas teniendo como resultado, al otro lado de la compuerta, agua subterránea tratada (EPA, 2001; Alcoleta *et al.*, 2001 y Naft *et al.*, 2002). La Figura 7.3 muestra el esquema general de funcionamiento de este tipo de alternativa de remediación.



**Figura 7.3** Esquema general de funcionamiento de una PRB  
Fuente: (EPA, 2001)

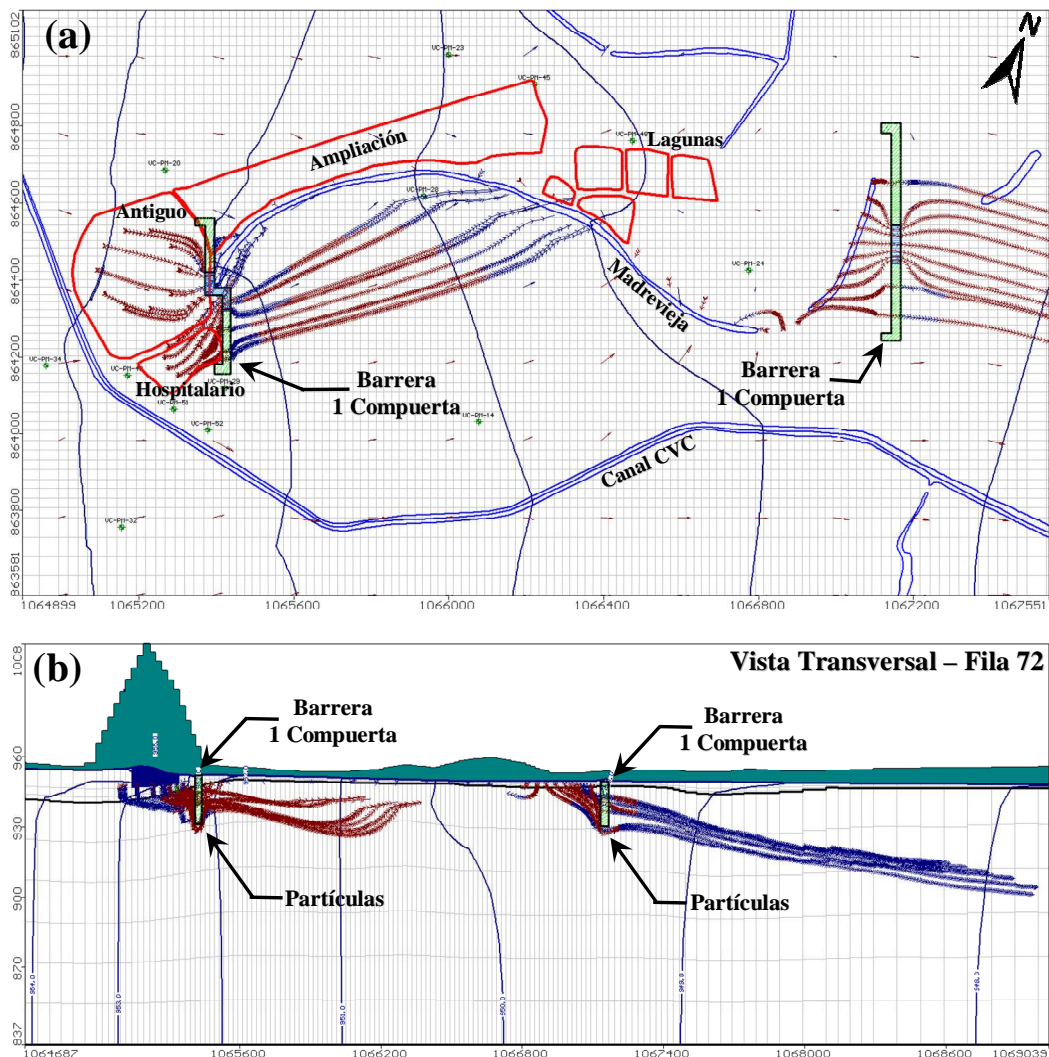
Su aplicación, como ocurre con algunos otros métodos, ha ido extendiéndose y, actualmente, se está empleando y desarrollando dentro del campo de los metales pesados, radionúclidos o eliminación de nutrientes. Sin embargo, en la mayoría de los casos, este tipo de alternativa ha sido utilizada en acuíferos más superficiales, con profundidades no superiores a los 20 m (Naft *et al.*, 2002).

Entre los principales problemas asociados a este sistema de remediación se encuentra la selección de un adecuado medio reactivo. Esto implica la estimación del tiempo de residencia del agua contaminada en la zona de tratamiento y el cálculo de la vida útil del material reactivo. Experiencias recientes (Naft *et al.*, 2002) han demostrado que también se deben analizar los efectos negativos sobre el sistema de flujo de agua subterránea derivados de la construcción de la barrera impermeable, en donde se ha observado cambios en el gradiente y la dirección del escurrimiento, lo que conlleva a una propagación no prevista del agua contaminada tanto en la dirección horizontal como vertical. Sobre este último aspecto se focalizó la evaluación de esta alternativa.

Para la implementación de esta alternativa se ubicaron dos barreras reactivas con el fin de interceptar las partículas asignadas tanto en los cerros como en la *Madrevieja*. La ubicación de las mismas se muestra en la Figura 7.4. Para la representación de la barrera impermeable se asignó a las celdas que corresponden a la pared impermeable una conductividad hidráulica de  $K = 10^{-5}$  m/día y sobre las zonas de la barrera geoquímica se asignó una  $K = 60$  m/día. Se analizaron dos tipos de configuraciones: a) la primera con una compuerta geoquímica en cada barrera y b) la segunda con tres compuertas geoquímicas.



La Figura 7.4(a) presenta el recorrido realizado por las partículas cuando interceptan las barreras con una compuerta geoquímica. En ambas barreras se detecta claramente que solo algunas de las partículas asignadas cruzan la barrera por la compuerta reactiva. Además, y dada la modificación de la dirección del flujo, debido a la obstrucción que produce la barrera impermeable, las partículas sufren un desplazamiento en la dirección vertical (Figura 7.4(b)) provocando la profundización del agua subterránea contaminada. Esta alternativa no alcanzó el objetivo de reducir o detener la propagación de la pluma.

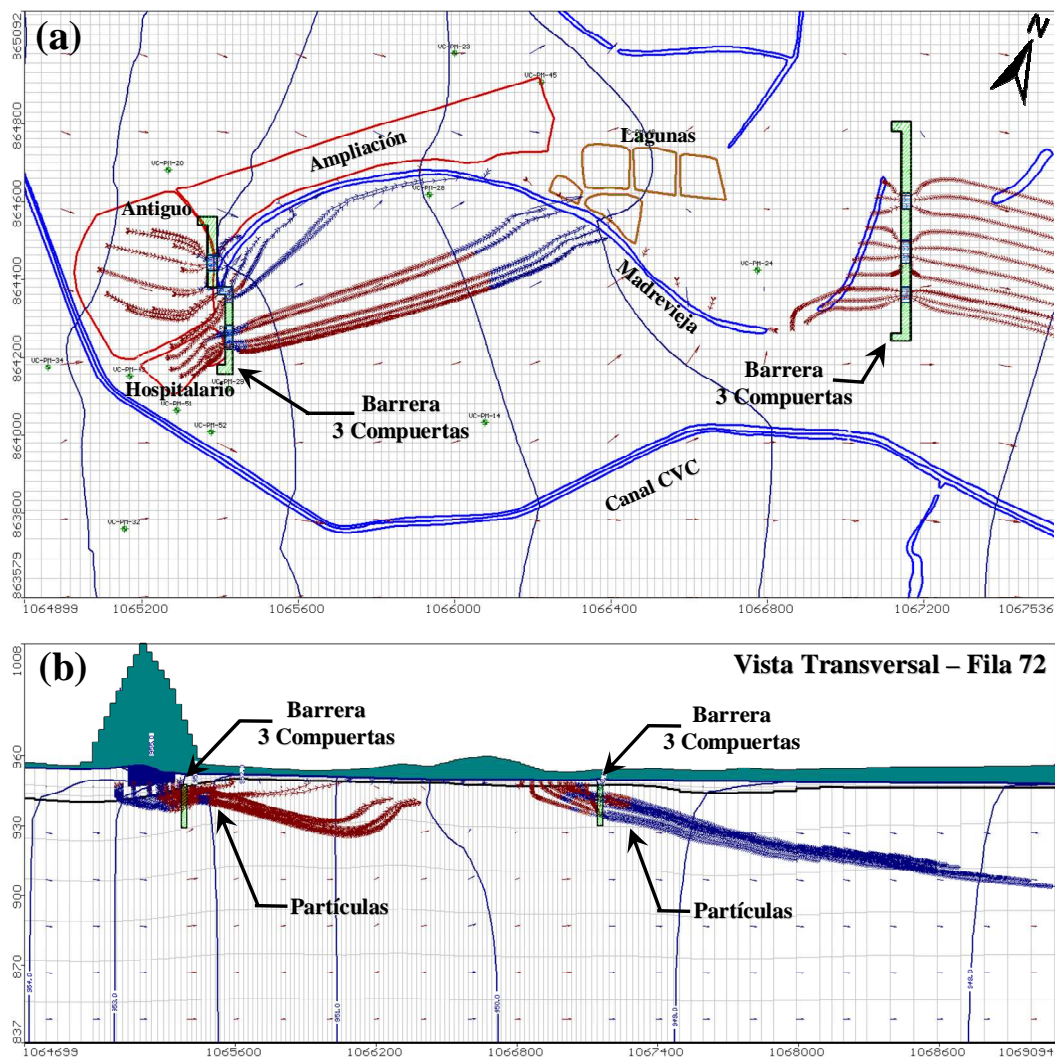


**Figura 7.4 Barreras impermeable – configuración de 2 barreras con 1 compuerta PRB**

La Figura 7.5(a) presenta el resultado del rastreo de partículas para la segunda configuración. En este caso se asignaron a cada una de las barreras 3 compuertas geoquímicas. Para esta composición se logró que el total de las partículas asignadas atravesaran las zonas reactivas. Respecto a la modificación en la configuración del flujo,

en este caso no se producen efectos negativos de desplazamiento vertical de la pluma (Figura 7.5(b)). Por el contrario, se observa cómo las partículas atraviesan efectivamente las barreras.

La tasa de flujo estimada con el balance de masas indica que, para esta distribución, hacia las compuertas de tratamiento se dirige un total de 324 m<sup>3</sup>/día, de los cuales 173 m<sup>3</sup>/día corresponden a la barrera ubicada en el sector de los cerros y 151 m<sup>3</sup>/día corresponden a la barrera ubicada en las cercanías de la *Madrevieja*.



**Figura 7.5 Barrera permeable – configuración de 2 barreras con 3 compuertas PRB**

En función de los resultados obtenidos con las dos configuraciones propuestas es evidente que la alternativa que ofrece mayor eficiencia es la que considera 3 compuertas geoquímicas por barrera.



## 7.5 Comparación de alternativas evaluadas

Para la comparación de las diferentes alternativas evaluadas se tuvieron en cuenta los siguientes criterios cualitativos (IHOBE, 2000):

- Eficacia de captura de partículas contaminantes.
- Cantidad de volumen de agua captada para su tratamiento.
- Complejidad constructiva de la obra.
- Prácticas de operación y mantenimiento.

Con el fin de comparar cada una de las alternativas de remediación propuestas, y considerando los aspectos recientemente mencionados, se construyó la siguiente tabla (Tabla 7.1):

**Tabla 7.1 Comparación de alternativas de remediación evaluadas.**

Alternativa	Configuración	Captura de partículas	Volumen captado (m <sup>3</sup> /día)	Complejidad de construcción	Operación y Mantenimiento
(1) Pozos de bombeo	(a) 2 Baterías Total: 9 pozos	Completa	550	Baja	Medio
	(b) 2 Baterías Total: 5 pozos	Incompleta	690	Baja	Medio
(2) Zanja interceptora	Tubo de drenaje Longitud total: 580 m	Completa	1897	Alta	Baja
(3) Barrera impermeable con compuertas geoquímicas	1 Compuerta	Incompleta	256	Muy Alta	Muy Alta
	3 Compuertas	Completa	324	Muy Alta	Muy Alta

La **Alternativa 1a** (barrera hidráulica con 9 pozos de bombeo) produce una captura completa de todas las partículas asignadas, pero con la extracción de un volumen de agua considerable para su posterior tratamiento en superficie.

En el caso de la zanja interceptora, **Alternativa 2**, si bien logra capturar todas las partículas asignadas, al igual que en el caso anterior, se produce la descarga de un gran volumen de agua para su posterior tratamiento. Además, el principal inconveniente de esta alternativa se encuentra en la alta complejidad de su ejecución. Se requiere de la instalación de una

longitud de 580 m de tubos de drenaje, a una profundidad promedio de 7 m, lo que podría comprometer la estabilidad del terreno, especialmente en la base de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*.

Para el caso de la **Alternativa 3** (barreras impermeables y compuertas geoquímicas) la configuración más eficiente es la compuesta por 3 compuertas. Con ello se logra capturar todas las partículas asignadas. Su complejidad radica principalmente, en su construcción, operación y mantenimiento.

De esta comparación cualitativa surge que, de las distintas alternativas evaluadas, la opción más viable es la del sistema de pozos de bombeo, con 6 pozos en la zona de los cerros y 3 en la zona de la *Madrevieja*, y con un caudal total de extracción de 550 m<sup>3</sup>/día.

## Capítulo 8: Conclusiones y Recomendaciones

En la actualidad, las nuevas normativas referentes a la disposición final de residuos de una comunidad establecen los requerimientos mínimos que deben presentar este tipo de instalaciones, no solo teniendo en cuenta las características del residuo sino también los condicionantes geológicos e hidrológicos del propio emplazamiento. De esta forma, los nuevos depósitos controlados son ahora obras de ingeniería complejas y de una adecuada seguridad.

No obstante, en muchas comunidades, la eliminación de los residuos sólidos urbanos comienza en depósitos ubicados en sitios no acondicionados para tal fin. Estas instalaciones han supuesto en el pasado, y aún siguen siendo en la actualidad, focos potenciales de peligrosidad para el ambiente, y más concretamente para las aguas subterráneas de la zona donde se ubican. La falta de mecanismos de vigilancia y control han sido el motivo principal por el cual el impacto de estos sitios ha pasado desapercibido.

Se pone de manifiesto, entonces, la importancia que reviste un buen reconocimiento hidrogeológico del emplazamiento durante la selección del mismo así como una caracterización del estado de calidad química del agua subterránea. A pesar de la trascendencia que reviste el tema, hasta el momento no se había encarado en la ciudad de Cali un estudio integral, que tuviera en cuenta los distintos aspectos relacionados a la disciplina hidrogeológica, necesarios para caracterizar el estado del sistema hídrico subterráneo y su posible afección debido a la emisión continua de una carga contaminante generada en el relleno sanitario de Navarro.

En este caso particular resultó evidente que aspectos relacionados con la geomorfología, geología de superficie y alta interacción con cuerpos de agua superficial, le confieren al sitio una alta complejidad hidrogeológica. Esto se hace más notorio en el área inmediatamente subyacente al relleno y sus proximidades, en especial con cuestiones inherentes a la dinámica del movimiento del agua subterránea.

Cabe destacar que la zona de estudio cuenta con gran cantidad de información base desarrollada para diferentes proyectos, y por distintos organismos. Y aún en el caso que los estudios pertenecieran a un mismo organismo, tuvieron enfoques diferentes, escalas de observación diferentes y sistemas de referencia diferentes. Esto motivó que, para poder aprovechar el volumen de datos disponibles, se tuviera que invertir una importante cantidad de tiempo en analizar y depurar los datos, así como en compatibilizar los mismos. Merced a esta tarea se generó una base de datos apropiada y consolidada, que facilitó su procesamiento y posterior interpretación a los fines de la definición del modelo conceptual de funcionamiento del sistema acuífero del área de estudio.

El desarrollo del sistema de información geográfica (*SIG*), además de contribuir en la administración de la información existente, fue una herramienta útil para el análisis de la misma. La información, ordenada y relacionada convenientemente, brindó las evidencias necesarias para el desarrollo del modelo conceptual y posterior implementación de los modelos de flujo y transporte.

Con relación a los rasgos hidrogeológicos más importantes, el sector estudiado de Navarro presenta las características definidas a nivel regional para la zona plana del valle geográfico del río Cauca. La unidad hidrogeológica que revistió mayor importancia a los fines de esta tesis de maestría fue la *Unidad A* de la cual se destacan los siguientes aspectos:

- (1) La *Unidad A* está conformada por sedimentos no consolidados, aportados tanto por el río Cauca como por los principales tributarios de la zona (ríos Meléndez y Lili). En gran parte del área, el comportamiento hidráulico de esta unidad es de tipo libre y en algunos sectores con drenaje diferido. Esto se debe a la presencia o ausencia de la *Unidad superficial* constituida primordialmente por materiales arcillo-limosos y arenosos finos, que la suprayace. Inferiormente está limitada por la *Unidad B* que, a los fines de este estudio, constituye el basamento hidrogeológico.
- (2) El espesor promedio de la *Unidad A* en el sector es de unos 83 m. Los valores de conductividad hidráulica varían entre 3 y 51 m/día. El coeficiente de

almacenamiento presenta un rango entre  $1 \times 10^{-3}$  –  $1.5 \times 10^{-3}$ . A la porosidad eficaz se le asignaron valores de entre 0,1 y 0,2.

(3) Al analizar la información recopilada resultó evidente el alto grado de vulnerabilidad a la contaminación que reviste la *Unidad A*. En diferentes reportes técnicos y en función de los datos hidroquímicos analizados, se pone de manifiesto esta propiedad intrínseca del medio.

(4) En el área de estudio, la principal entrada de agua al sistema es la que se aporta por el exceso de precipitación. De acuerdo a los resultados del balance hídrico, éste fue de 260 mm/año. Otra entrada de agua al sistema se presenta a través de las zonas de falla de la cordillera occidental y de los conos aluviales de los ríos Lili y Meléndez, tributarios del río Cauca. Este ingreso se materializa a través de la isopieza de 960 m, valor que puede variar en  $\pm 1$ m dependiendo del período climatológico imperante. En relación a las salidas, la más importante ocurre en los sectores donde se presentan las interacciones entre el agua subterránea y los cuerpos de agua superficial.

(5) En el sector *Oeste* del área de estudio, el gradiente hidráulico promedio fue calculado en 0,0040 m/m. En el área subyacente y en los entornos del relleno sanitario, el gradiente alcanza valores de 0,0027 m/m. Ya en el sector de salida, el gradiente hidráulico se estimó en 0,0010 m/m. Por lo tanto, las velocidades de flujo oscilan entre 0,06 m/día y 0,15 m/día.

Para la evaluación de la respuesta del sistema acuífero a los lixiviados producidos en el relleno sanitario, primeramente se realizó un análisis de la información hidroquímica disponible:

- La clasificación hidroquímica *de Piper-Hill-Langelier* permitió identificar la presencia de tres diferentes tipos de agua. El primero correspondió a aguas de tipo “*bicarbonatada magnésica*”, que es el que regionalmente predomina en el área; corresponden a este tipo los pozos que se encuentran más alejados y aguas arriba del relleno. El segundo tipo de aguas identificado fue “*bicarbonatada sódica*”, representativo de los pozos ubicados sobre el sector *Sur-Oeste* del cerro

*Ampliación.* El tercer tipo identificado fue “*clorurada magnésica*”, para la mayoría de los pozos ubicados en las cercanías de los cerros *Antiguo*, *Hospitalario* y sobre el área periférica de la *Madrevieja*. Aquí es donde se evidencia la afectación de la calidad del agua subterránea por parte del relleno.

- El análisis de la evolución temporal contempló la variación en los tenores iónicos de cloruros (*Cl*-), sulfatos, magnesio, bicarbonatos y los parámetros físico-químicos de conductividad eléctrica (*CE*) y sólidos disueltos totales (*TDS*), comparados con los máximos valores establecidos por el Decreto 1575 del Ministerio de Medio Ambiente y Protección Social de Colombia. Principalmente se observaron variaciones significativamente altas en los pozos cercanos a los sectores de los cerros y *Madrevieja*, los cuales excedían los límites máximos del Decreto 1575 (como fue el caso del pozo Vc-pm-40 que presentó valores de *CE* de 1365  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de *TSD* de 780 mg/l). Además, el ión cloruro fue el que indicó mayor variación en su concentraciones. Los pozos más cercanos a los cerros y la *Madrevieja* presentaban valores superiores a 274 mg/l.
- Se identificó que el principal ingreso de lixiviados al sistema acuífero es el que ocurre a través de las bases de los cerros “*Antiguo*” y “*Hospitalario*” y a través del paleocauce (*Madrevieja*). Esta última por ser una receptora directa de los lixiviados por escurrimiento superficial o de infiltración de los cerros contiguos. Otro sector en el cual se podría producir un eventual ingreso de contaminantes al acuífero es el que corresponde a las lagunas de almacenamiento de lixiviados, en especial debido a la cercanía del nivel freático y posición topográfica.

Para la representación de la posible trayectoria del agua percolada a través de los residuos del relleno de Navarro, se implementó un modelo matemático hidrogeológico, bajo la condición de régimen estacionario, con la aplicación Visual Modflow. Esta herramienta permitió representar con fidelidad el funcionamiento hidrodinámico del área de estudio. El análisis de sensibilidad llevado a cabo, luego de la etapa de calibración del modelo, indicó que la conductividad hidráulica es, de los parámetros considerados, el que exhibe la mayor sensibilidad para representar y simular el comportamiento hidrogeológico del sistema.



Como primera aproximación para evaluar la trayectoria seguida por el agua percolada a través del relleno se consideró transporte advectivo. Para ello se aplicó el código *Modpath*. Los resultados obtenidos mostraron la alta posibilidad de que una pluma contaminante con origen en la base de los cerros Antiguo y Hospitalario llegase a las inmediaciones del río Cauca.

La implementación del modelo de transporte, que se considera de carácter interpretativo, consistió en la representación de una pluma de cloruro, para lo cual se definieron 5 escenarios de transporte:

- Los tres primeros escenarios propuestos contemplaron como única fuente de ingreso del contaminante la base de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*. El tiempo de simulación para el escenario 1 fue de 100 años; los escenarios 2 y 3 contemplaron como variante una posible atenuación de la contaminación a los 100 años y 50 años, respectivamente. Los tres escenarios mostraron, en los primeros años de simulación, cómo el sector de la *Madrevieja* constituye una vía de avance preferencial.
- El escenario 4 que contempla además la presencia de lixiviado a lo largo de *Madrevieja* da como resultado la formación de dos plumas importantes: la primera de ellas generada desde la base de los cerros y la segunda desde la *Madrevieja*. Esta posibilidad estaría indicando que la calidad del agua subterránea que descarga en el río estaría deteriorada. Hecho que debe tenerse muy en cuenta ya que el río Cauca es la principal fuente de abastecimiento de agua de la ciudad de Santiago de Cali.
- Finalmente, en el escenario 5 se consideró una posible fuga a través de las bases de las lagunas de almacenamiento de lixiviado a partir del año 30. La pluma generada en una de ellas (desde el punto A) descarga rápidamente sobre la *Madrevieja* mientras que la pluma generada desde el punto B se desplaza en dirección al río Cauca

En función de los resultados obtenidos con el modelo de transporte se propone la ampliación de la red de monitoreo actual, en particular, densificar y profundizar los puntos de observación en aquellos sectores que indicaron la presencia de la pluma contaminante.

Finalmente, esta tesis de maestría contempló el análisis de la implementación de tres posibles alternativas de remediación (*pozos de bombeo, zanjas interceptoras y barrera impermeable con compuerta geoquímica*). Estas sólo se evaluaron desde el punto vista hidrodinámico, mediante la aplicación de la técnica de seguimiento de partículas desde las zonas contaminadas. De las diferentes alternativas propuestas, la opción más viable fue la del sistema de pozos de bombeo, con la instalación de 6 pozos en la zona de los cerros y 3 en la zona de la *Madrevieja*. Esta configuración implica la extracción de  $550 \text{ m}^3/\text{día}$  del acuífero para su posterior tratamiento en superficie.

En función de los resultados alcanzados en este proyecto, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Definir para la zona un plano único de referencia, al cual se puedan acoplar datos de la topografía del sector, niveles de agua en las fuentes superficiales, niveles de agua en pozos de observación y calidad de agua en ambos puntos de observación.
2. Se deberían realizar estudios complementarios para cuantificar y validar la conexión hidráulica entre los cursos de agua superficiales, incluido el antiguo paleocauce (*Madrevieja*) y el sistema acuífero del sector.
3. En función de los resultados del balance hídrico general, los cuales mostraron como principal fuente de entrada de agua al sistema, a la recarga proveniente de los excesos de la lluvia, es aconsejable revisar con mayor atención la estimación de la misma, debido a que hasta el momento no se llevaron a cabo estudios para permitir una evaluación más precisa.
4. Si bien es cierto que los niveles en la zona de estudio presentan poca variación, es aconsejable tener mayor cantidad de registros, incluso continuos, con el objetivo de poder evaluar más fácilmente cualquier evolución temporal que pudiera producirse. En lo que respecta a la calidad del agua, sería conveniente contar con más de una determinación por año, seleccionando para ello los pozos más representativos de la red de monitoreo.
5. Se considera que el sistema de flujo característico del sector es muy lento, razón por la cual la pluma tiende a alcanzar profundidades importantes ( $>30\text{m}$ ). Por lo tanto, para monitorear adecuadamente sería necesario contar con pozos de mayor profundidad que los actuales.

6. Para mejorar el modelo de transporte sería necesario contar con una de adecuada red de monitoreo y con determinaciones *in situ* de la dispersividad. Dada la variabilidad espacial que este parámetro presenta, se recomienda también realizar una serie de ensayos de laboratorio, con muestras del sector para su adecuada determinación.

Se estima que los resultados alcanzados en esta tesis de maestría contribuyen al conocimiento del estado actual del sistema acuífero en el área del antiguo relleno sanitario de Navarro, y constituyen un elemento de juicio objetivo en relación al deterioro del recurso producto de la actividad humana.

Además, se considera que se está brindando una herramienta que facilita el proceso de toma de decisión e ilustra, de manera científicamente fundamentada, a los distintos organismos involucrados en la temática –fundamentalmente a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, receptor natural y directo de estos resultados– al momento de evaluar la adopción de estrategias para el manejo ambiental en el área de estudio.

## **Listado de Anexos**

*Anexo 1. Diferencias de cotas de terreno de puntos de agua*

*Anexo 2. Instalación del SIG*

*Anexo 3. Mapa de localización de puntos de agua seleccionados*

*Anexo 4. Cota de la superficie de agua de los principales cursos del área*

*Anexo 5. Nivel del agua superficial para el modelo inicial de flujo*

*Anexo 6. Variación de parámetros – Análisis de sensibilidad*

*Anexo 7. Localización (X, Y) de pozos de monitoreo propuestos*

*Anexo 1. Diferencias de cotas de terreno de puntos de agua*

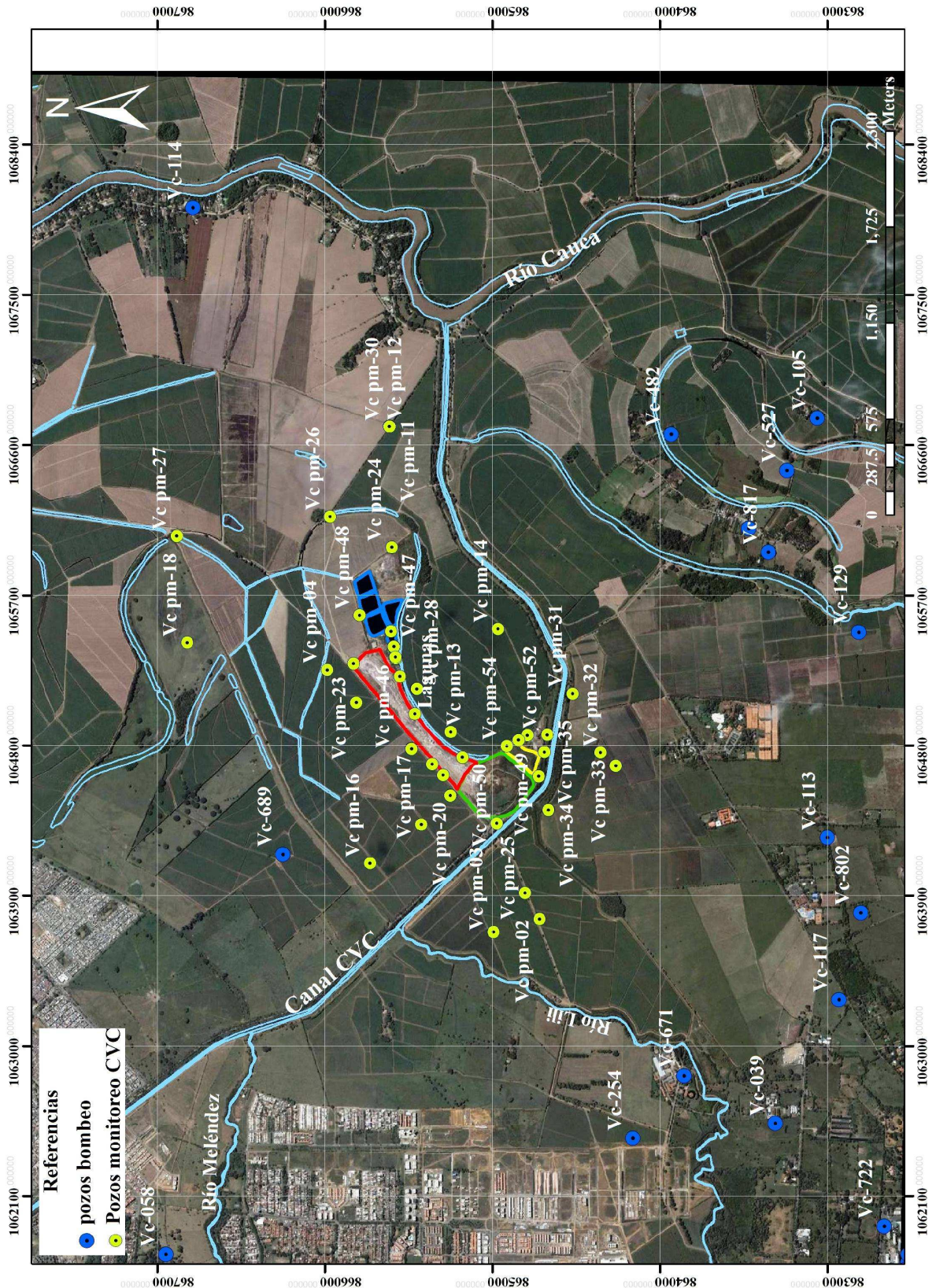
<b>Pozo</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>	<b>Topografía CVC</b>	<b>Topografía IGAC</b>	<b>Diferencia</b>
Vc-pm-01	1064782.00	865481.00	959.55	953.93	-5.62
Vc-pm-02	1063759.92	864718.13	960.03	960.34	0.31
Vc-pm-03	1063683.92	864993.13	958.81	960.02	1.21
Vc-pm-04	1065254.03	865984.99	952.74	952.87	0.13
Vc-pm-10	1065138.92	865452.13	955.59	954.45	-1.14
Vc-pm-11	1066713.00	865614.00	954.04	953.99	-0.05
Vc-pm-12	1066713.00	865614.00	954.04	953.99	-0.05
Vc-pm-13	1064881.03	865248.99	955.40	954.69	-0.71
Vc-pm-14	1065500.00	864967.00	953.95	954.09	0.14
Vc-pm-15	1064781.00	865482.00	959.06	953.93	-5.13
Vc-pm-16	1064096.00	865731.00	954.81	955.02	0.21
Vc-pm-17	1064327.00	865423.00	955.25	955.39	0.14
Vc-pm-18	1065416.00	866822.00	955.67	955.73	0.06
Vc-pm-19	1064504.00	865248.00	957.19	955.23	-1.96
Vc-pm-20	1064500.00	865251.00	955.22	955.22	0.00
Vc-pm-21	1065395.00	865587.00	959.55	952.79	-6.76
Vc-pm-22	1065392.00	865587.00	959.48	952.79	-6.69
Vc-pm-23	1065057.00	865813.00	953.77	953.77	0.00
Vc-pm-24	1065988.00	865601.00	958.06	953.00	-5.06
Vc-pm-25	1063917.00	864804.00	958.25	959.88	1.63
Vc-pm-26	1066172.00	865970.00	951.94	951.88	-0.06
Vc-pm-27	1066055.00	866885.00	955.29	955.29	0.00
Vc-pm-28	1065140.00	865450.00	955.44	954.47	-0.97
Vc-pm-29	1064862.00	864790.00	961.08	955.02	-6.06
Vc-pm-30	1066711.00	865614.00	953.47	953.99	0.52
Vc-pm-31	1065112.00	864520.00	954.91	954.94	0.03
Vc-pm-32	1064758.03	864353.99	955.02	955.02	0.00
Vc-pm-33	1064680.00	864262.00	955.29	955.29	0.00
Vc-pm-34	1064415.00	864663.00	955.02	955.02	0.00
Vc-pm-35	1064415.00	864665.00	955.02	955.02	0.00
Vc-pm-39	1064688.32	865358.20	963.72	954.65	-9.07
Vc-pm-40	1065324.00	865577.00	958.05	952.84	-5.21
Vc-pm-41	1065331.00	865579.00	959.00	952.83	-6.17
Vc-pm-42	1064730.00	865178.00	967.06	954.11	-12.95
Vc-pm-43	1064624.00	865294.00	968.80	954.94	-13.86
Vc-pm-44	1064990.00	865463.00	962.12	954.12	-8.00
Vc-pm-45	1065291.00	865830.00	960.00	952.1	-7.90
Vc-pm-46	1065215.00	865551.00	960.63	953.02	-7.61
Vc-pm-47	1065484.00	865605.00	961.47	952.87	-8.60
Vc-pm-48	1065581.00	865794.00	960.54	952.51	-8.03
Vc-pm-49	1064618.00	864722.00	964.00	962.1	-1.90
Vc-pm-50	1064334.00	864974.00	966.26	955.29	-10.97
Vc-pm-51	1064762.00	864689.00	963.00	958.56	-4.44
Vc-pm-52	1064865.00	864672.00	963.98	955.02	-8.96
Vc-pm-53	1064833.00	864843.00	961.00	959.25	-1.75
Vc-pm-54	1064797.00	864914.00	962.09	955.02	-7.07

## *Anexo 2. Instalación del SIG*

La aplicación recibió el nombre de “*zona\_estudio.mxd*”. Se encuentra referenciada como un proyecto de Arc-Gis 9. Se localiza en el CD anexo a este estudio en la carpeta de nombre “*arcgis*” en la siguiente dirección: *CD:\arcgis\aplicacion\zona\_estudio.mxd*, y en la cual se encuentran las diferentes capas temáticas desarrolladas en formato (*\*.shp*). Para su instalación se copia esta carpeta en el disco C, del equipo a instalar. Para visualizar las capas desarrolladas se debe tener previamente instalado el programa Arc-Gis 9 o una versión Arc Reader.



Anexo 3. Mapa de localización de puntos de agua seleccionados



Anexo 4. Cota de la superficie de agua de los principales cursos del área

**Niveles Calculados – Río Cauca**

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
17	948.73	948.56	948.55	948.93	948.94	948.35	947.68	947.35	947.32	948.21	949.23	949.26	948.43
18	948.70	948.52	948.52	948.90	948.91	948.32	947.64	947.31	947.28	948.18	949.21	949.23	948.39
19	948.67	948.49	948.48	948.87	948.89	948.28	947.61	947.28	947.24	948.15	949.18	949.20	948.36
20	948.64	948.46	948.45	948.84	948.86	948.25	947.57	947.24	947.21	948.11	949.15	949.17	948.33
21	948.61	948.42	948.42	948.81	948.83	948.22	947.54	947.20	947.17	948.08	949.12	949.14	948.30
22	948.58	948.39	948.39	948.78	948.80	948.19	947.50	947.17	947.13	948.05	949.09	949.11	948.26
23	948.55	948.36	948.36	948.75	948.77	948.16	947.46	947.13	947.09	948.02	949.07	949.09	948.23
24	948.52	948.32	948.32	948.72	948.74	948.12	947.43	947.09	947.05	947.99	949.04	949.06	948.20
25	948.48	948.29	948.29	948.69	948.71	948.09	947.39	947.05	947.01	947.96	949.01	949.03	948.17
26	948.45	948.26	948.26	948.66	948.68	948.06	947.36	947.02	946.98	947.92	948.98	949.00	948.14
27	948.42	948.22	948.23	948.63	948.65	948.03	947.32	946.98	946.94	947.89	948.95	948.97	948.10
28	948.39	948.19	948.19	948.61	948.62	947.99	947.28	946.94	946.90	947.86	948.92	948.94	948.07
29	948.36	948.16	948.16	948.58	948.59	947.96	947.25	946.90	946.86	947.83	948.90	948.91	948.04
30	948.33	948.13	948.13	948.55	948.56	947.93	947.21	946.87	946.82	947.80	948.87	948.89	948.01
31	948.30	948.09	948.10	948.52	948.53	947.90	947.18	946.83	946.78	947.76	948.84	948.86	947.97
32	948.27	948.06	948.06	948.49	948.50	947.86	947.14	946.79	946.75	947.73	948.81	948.83	947.94
33	948.24	948.03	948.03	948.46	948.47	947.83	947.11	946.75	946.71	947.70	948.78	948.80	947.91
34	948.21	947.99	948.00	948.43	948.45	947.80	947.07	946.72	946.67	947.67	948.75	948.77	947.88
35	948.18	947.96	947.97	948.40	948.42	947.77	947.03	946.68	946.63	947.64	948.73	948.74	947.84
36	948.15	947.93	947.94	948.37	948.39	947.74	947.00	946.64	946.59	947.61	948.70	948.71	947.81
37	948.12	947.89	947.90	948.34	948.36	947.70	946.96	946.60	946.55	947.57	948.67	948.69	947.78
38	948.08	947.86	947.87	948.31	948.33	947.67	946.93	946.57	946.52	947.54	948.64	948.66	947.75
39	948.05	947.83	947.84	948.28	948.30	947.64	946.89	946.53	946.48	947.51	948.61	948.63	947.72
40	948.02	947.80	947.81	948.25	948.27	947.61	946.86	946.49	946.44	947.48	948.58	948.60	947.68
41	947.99	947.76	947.77	948.22	948.24	947.57	946.82	946.46	946.40	947.45	948.56	948.57	947.65
42	947.96	947.73	947.74	948.19	948.21	947.54	946.78	946.42	946.36	947.42	948.53	948.54	947.62
43	947.93	947.70	947.71	948.16	948.18	947.51	946.75	946.38	946.32	947.38	948.50	948.51	947.59
44	947.90	947.66	947.68	948.13	948.15	947.48	946.71	946.34	946.29	947.35	948.47	948.49	947.55
45	947.87	947.63	947.65	948.10	948.12	947.45	946.68	946.31	946.25	947.32	948.44	948.46	947.52
46	947.84	947.60	947.61	948.07	948.09	947.41	946.64	946.27	946.21	947.29	948.42	948.43	947.49
47	947.81	947.56	947.58	948.04	948.06	947.38	946.60	946.23	946.17	947.26	948.39	948.40	947.46
48	947.78	947.53	947.55	948.01	948.03	947.35	946.57	946.19	946.13	947.23	948.36	948.37	947.43
49	947.75	947.50	947.52	947.98	948.00	947.32	946.53	946.16	946.09	947.19	948.33	948.34	947.39
50	947.71	947.46	947.48	947.95	947.98	947.28	946.50	946.12	946.06	947.16	948.30	948.31	947.36
51	947.68	947.43	947.45	947.92	947.95	947.25	946.46	946.08	946.02	947.13	948.27	948.29	947.33
52	947.65	947.40	947.42	947.89	947.92	947.22	946.43	946.04	945.98	947.10	948.25	948.26	947.30
53	947.62	947.37	947.39	947.86	947.89	947.19	946.39	946.01	945.94	947.07	948.22	948.23	947.26
54	947.59	947.33	947.35	947.83	947.86	947.15	946.35	945.97	945.90	947.04	948.19	948.20	947.23
55	947.56	947.30	947.32	947.80	947.83	947.12	946.32	945.93	945.87	947.00	948.16	948.17	947.20
56	947.53	947.27	947.29	947.77	947.80	947.09	946.28	945.89	945.83	946.97	948.13	948.14	947.17
57	947.50	947.23	947.26	947.74	947.77	947.06	946.25	945.86	945.79	946.94	948.10	948.11	947.13

Continuación - Anexo 4. Cota de la superficie de agua de los principales cursos del área

**Niveles Calculados – Río Meléndez**

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
26	960.17	959.98	959.99	960.36	960.38	959.82	959.17	958.85	958.81	959.69	960.65	960.66	959.88
27	959.28	959.09	959.10	959.48	959.50	958.92	958.25	957.92	957.88	958.79	959.78	959.80	958.98
28	958.40	958.20	958.20	958.61	958.62	958.02	957.32	956.98	956.94	957.88	958.92	958.93	958.09
29	957.03	956.81	956.82	957.25	957.26	956.62	955.89	955.54	955.49	956.49	957.57	957.59	956.70

**Niveles Calculados – Río Lili**

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
22	962.02	961.91	961.91	962.14	962.16	961.81	961.41	961.21	961.18	961.72	962.29	962.31	961.84
23	961.55	961.44	961.44	961.69	961.71	961.33	960.91	960.71	960.68	961.24	961.84	961.86	961.37
24	961.09	960.97	960.97	961.23	961.25	960.86	960.41	960.20	960.17	960.76	961.40	961.42	960.89
25	960.63	960.50	960.50	960.77	960.79	960.38	959.92	959.69	959.66	960.28	960.96	960.97	960.42
26	960.17	960.03	960.03	960.32	960.34	959.91	959.42	959.18	959.15	959.80	960.51	960.53	959.95
27	959.70	959.56	959.56	959.86	959.88	959.43	958.92	958.67	958.64	959.33	960.07	960.09	959.48
28	959.24	959.09	959.10	959.41	959.42	958.96	958.42	958.16	958.13	958.85	959.62	959.64	959.00
29	958.78	958.62	958.63	958.95	958.97	958.48	957.93	957.66	957.62	958.37	959.18	959.20	958.53
30	958.32	958.15	958.16	958.49	958.51	958.00	957.43	957.15	957.11	957.89	958.73	958.75	958.06
31	957.85	957.68	957.69	958.04	958.05	957.53	956.93	956.64	956.60	957.41	958.29	958.31	957.59
32	957.39	957.22	957.22	957.58	957.60	957.05	956.43	956.13	956.09	956.93	957.85	957.86	957.11
33	956.93	956.75	956.75	957.12	957.14	956.58	955.94	955.62	955.58	956.45	957.40	957.42	956.64
34	956.47	956.28	956.28	956.67	956.69	956.10	955.44	955.12	955.07	955.98	956.96	956.98	956.17
35	956.01	955.81	955.81	956.21	956.23	955.62	954.94	954.61	954.56	955.50	956.51	956.53	955.70
36	955.54	955.34	955.34	955.76	955.77	955.15	954.44	954.10	954.06	955.02	956.07	956.09	955.22
37	955.08	954.87	954.87	955.30	955.32	954.67	953.94	953.59	953.55	954.54	955.63	955.64	954.75

**Niveles Calculados – Canal CVC**

Punto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	948.27	948.06	948.06	948.49	948.50	947.86	947.14	946.79	946.75	947.73	948.81	948.83	947.94
2	948.59	948.38	948.39	948.81	948.83	948.19	947.47	947.12	947.07	948.06	949.14	949.15	948.27
3	948.92	948.71	948.71	949.14	949.15	948.51	947.79	947.44	947.39	948.38	949.46	949.48	948.59
4	949.24	949.03	949.04	949.46	949.48	948.84	948.11	947.76	947.72	948.71	949.78	949.80	948.91
5	949.57	949.36	949.36	949.78	949.80	949.16	948.44	948.09	948.04	949.03	950.11	950.13	949.24
6	949.89	949.68	949.69	950.11	950.13	949.49	948.76	948.41	948.36	949.35	950.43	950.45	949.56
7	950.22	950.01	950.01	950.43	950.45	949.81	949.09	948.73	948.69	949.68	950.76	950.78	949.89
8	950.54	950.33	950.33	950.76	950.77	950.13	949.41	949.06	949.01	950.00	951.08	951.10	950.21
9	950.86	950.65	950.66	951.08	951.10	950.46	949.73	949.38	949.34	950.33	951.41	951.43	950.54
10	951.19	950.98	950.98	951.41	951.42	950.78	950.06	949.71	949.66	950.65	951.73	951.75	950.86
11	951.51	951.30	951.31	951.73	951.75	951.11	950.38	950.03	949.98	950.97	952.06	952.07	951.18
12	951.84	951.63	951.63	952.05	952.07	951.43	950.71	950.35	950.31	951.30	952.38	952.40	951.51
13	952.16	951.95	951.96	952.38	952.40	951.76	951.03	950.68	950.63	951.62	952.71	952.72	951.83
14	952.49	952.28	952.28	952.70	952.72	952.08	951.35	951.00	950.96	951.95	953.03	953.05	952.16
15	952.81	952.60	952.60	953.03	953.05	952.40	951.68	951.33	951.28	952.27	953.35	953.37	952.48
16	953.13	952.92	952.93	953.35	953.37	952.73	952.00	951.65	951.60	952.60	953.68	953.70	952.81
17	953.46	953.25	953.25	953.68	953.69	953.05	952.32	951.97	951.93	952.92	954.00	954.02	953.13
18	953.78	953.57	953.58	954.00	954.02	953.38	952.65	952.30	952.25	953.24	954.33	954.35	953.45
19	954.11	953.90	953.90	954.33	954.34	953.70	952.97	952.62	952.57	953.57	954.65	954.67	953.78
20	954.43	954.22	954.23	954.65	954.67	954.02	953.30	952.94	952.90	953.89	954.98	954.99	954.10
21	954.76	954.55	954.55	954.97	954.99	954.35	953.62	953.27	953.22	954.22	955.30	955.32	954.43
22	955.08	954.87	954.87	955.30	955.32	954.67	953.94	953.59	953.55	954.54	955.63	955.64	954.75

*Anexo 5. Nivel del agua superficial para el modelo inicial de flujo*

***Niveles Calculados – Río Cauca***

<b>Punto</b>	<b>21 Febrero 2004</b>	<b>16 Enero 2005</b>	<b>20 Julio 2005</b>	<b>14 Enero 2006</b>	<b>13 Abril 2007</b>
29	948.16	948.36	947.25	948.36	948.58
32	948.06	948.27	947.14	948.27	948.49
50	947.46	947.71	946.50	947.71	947.95

***Niveles Calculados – Río Lili***

<b>Punto</b>	<b>21 Febrero 2004</b>	<b>16 Enero 2005</b>	<b>20 Julio 2005</b>	<b>14 Enero 2006</b>	<b>13 Abril 2007</b>
28	959.09	959.24	958.42	959.24	959.41
37	954.87	955.08	953.94	955.08	955.30

***Niveles Calculados – Canal CVC***

<b>Punto</b>	<b>21 Febrero 2004</b>	<b>16 Enero 2005</b>	<b>20 Julio 2005</b>	<b>14 Enero 2006</b>	<b>13 Abril 2007</b>
1	948.06	948.27	947.14	948.27	948.79
27	954.87	955.08	953.94	955.08	955.30

Anexo 6. Variación de parámetros – Análisis de sensibilidad

**Variaciones de Conductividad Hidráulica (K)**

<i>Esc-2</i>	<i>Aumenta 50%</i>		
<b>Zona</b>	<b>Kx</b>	<b>Ky</b>	<b>Kz</b>
1	4.5	4.5	0.45
2	13.5	13.5	1.35
3	22.5	22.5	2.25
4	31.5	31.5	3.15
5	40.5	40.5	4.05
6	49.5	49.5	4.95
7	1.5	1.5	0.15
8	0.15	0.15	0.015
9	58.5	58.5	5.85
10	61.5	61.5	6.15

<i>Esc-3</i>	<i>Aumenta 100%</i>		
<b>Zona</b>	<b>Kx</b>	<b>Ky</b>	<b>Kz</b>
1	6	6	0.6
2	18	18	1.8
3	30	30	3
4	42	42	4.2
5	54	54	5.4
6	66	66	6.6
7	2	2	0.2
8	0.2	0.2	0.02
9	78	78	7.8
10	82	82	8.2

<i>Esc-4</i>	<i>Disminuye 50%</i>		
<b>Zona</b>	<b>Kx</b>	<b>Ky</b>	<b>Kz</b>
1	1.5	1.5	0.15
2	4.5	4.5	0.45
3	7.5	7.5	0.75
4	10.5	10.5	1.05
5	13.5	13.5	1.35
6	16.5	16.5	1.65
7	0.5	0.5	0.05
8	0.05	0.05	0.005
9	19.5	19.5	1.95
10	20.5	20.5	2.05

<i>Esc-5</i>	<i>Disminuye 80%</i>		
<b>Zona</b>	<b>Kx</b>	<b>Ky</b>	<b>Kz</b>
1	0.6	0.6	0.06
2	1.8	1.8	0.18
3	3	3	0.3
4	4.2	4.2	0.42
5	5.4	5.4	0.54
6	6.6	6.6	0.66
7	0.2	0.2	0.02
8	0.02	0.02	0.002
9	7.8	7.8	0.78
10	8.2	8.2	0.82

Continuación - Anexo 6. Variación de parámetros – Análisis de sensibilidad

**Variaciones de Coeficiente de almacenamiento y porosidades**

<i>Esc-6</i>	<i>Aumenta 50%</i>			
<i>Zona</i>	<i>Ss</i>	<i>Sy</i>	<i>Eff. Por</i>	<i>Tot. Por</i>
1	0.0285	0.225	0.225	0.3
2	0.45	0.45	0.45	0.45

<i>Esc-7</i>	<i>Aumenta 100%</i>			
<i>Zona</i>	<i>Ss</i>	<i>Sy</i>	<i>Eff. Por</i>	<i>Tot. Por</i>
1	0.038	0.3	0.3	0.4
2	0.6	0.6	0.6	0.6

<i>Esc-8</i>	<i>Disminuye 50%</i>			
<i>Zona</i>	<i>Ss</i>	<i>Sy</i>	<i>Eff. Por</i>	<i>Tot. Por</i>
1	0.0095	0.075	0.075	0.1
2	0.15	0.15	0.15	0.15

	<i>Disminuye 80%</i>			
<i>Zona</i>	<i>Ss</i>	<i>Sy</i>	<i>Eff. Por</i>	<i>Tot. Por</i>
1	0.0038	0.03	0.03	0.04
2	0.06	0.06	0.06	0.06



*Anexo 7. Localización (X, Y) de pozos de monitoreo propuestos*

Pozo	Coordenada X	Coordenada Y
P1-1	1064842.29	865168.44
P1-2	1064987.60	864975.90
P1-3	1065147.44	865241.10
P1-4	1065398.11	865400.94
P2-1	1066347.26	866161.54
P2-2	1066452.60	865943.57
P2-3	1066670.56	865878.18
P2-4	1066499.82	865700.17
P2-5	1066412.63	865489.47
P2-6	1066960.03	865453.32
P2-7	1067054.67	865731.53
P2-8	1067269.00	865876.84
P2-9	1067051.04	865985.82
P2-10	1066938.42	866258.28

## Referencias Bibliográficas

- Alcolea, A.; Ayora, C.; Bernet, O.; Bolzicco, J.; Carrera, J.; Cortina, L.; Coscera, G.; De Pablo, J.; Domenech, C.; y Galache, J. (2001). "Barrera geoquímica". Boletín Geológico y Minero, Vol. Especial contaminación de suelos y agua en el accidente de Aznalcollar. Pág 229-256. IGME. Madrid. España.
- Alvarez, A. y Tenjo S. (1971). "Hidrogeología del Valle del Río Cauca entre Santander de Quilichao y El Río Sonso. Informe C.V.C. No. 71-4"; Informe INGEOMINAS N° 1568. Cali. Colombia.
- Anderson, M.P., Woessner. W.W. (2002) "Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport". Academic Press Inc., San Diego, California.
- Appelo, C.A.J., Postma, D. (1993). Geochemistry, groundwater and pollution. Ed. Balkema. 536 pp.
- ASCE - American Society of Civil Engineers, (1978). "Consumptive use of water and irrigation water requirements", ASCE.
- Azcuntar, O. (2000). "Impacto del basurero de Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas del municipio de Cali, Colombia". Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Dirección Técnica Ambiental. Informe Interno.
- Barrero, D. (1979). "Geology of the central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia, Publicaciones Geológicas Especiales de INGEOMINAS, 4, Pág 75.
- Berger Klaus, (2000). "Validation of the hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model for simulating the water balance of cover systems" Environmental Geology Vol. 39 (11).
- Bocanegra E., Martínez D., Massone H., Farenga M. (2004). "Simulación numérica en el estudio del flujo de contaminantes de un relleno sanitario. El caso de Mar del Plata, Argentina. T8-08". Congress XXXIII IAH - 7° ALHSUD Groundwater flow understanding: from local to regional scales. Zacatecas City, Mexico. Proceedings + CD.
- CENICAÑA – Centro de Investigaciones de la Caña de Azucar de Colombia. (1995). "El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia" Editores: Cassalet D., C.; Torres A., J.S.; Isaacs E., C.H., ISBN 958-33-0283-X – Cali, Colombia.
- Collazos, H. P. (2001). "Historia de la Gestión de la Basura en Cali. Santiago de Cali": El autor, Pág. 33 – 59.

- Collazos, H. P. (2004). “Cálculo de la producción de gases y lixiviados en el sitio de disposición final de las basuras de Cali (Navarro)”. En: ACODAL. N° 205 (junio 2004); pág. 42-46.
- Cruz R. R, (2002). “Anteproyecto de la clausura del tiradero a cielo abierto de Tultitlán, Estado de México”, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Cruz Valderrama, R. ; Torres, J.S. ; Besosa T., R. ; Gómez, J. ; Pantoja, J.E. (2009). “Función de K para mejorar la precisión en la programación de los riegos”. En: Congreso de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar, 8. Memorias. 8, Septiembre 16 al 18 de 2009, p.289-297. (ISSN) 978-958-95904-4-7 Cali, Colombia.
- Custodio E. y Llamas M. R. (1996). “Hidrología Subterránea”, Tomos I y II, Segunda Edición (1996), ISSN 84-282-0281 – 8. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2001). “Impacto del Basurero de Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas”, Informe Subdirección de Gestión Ambiental – Grupo de Aguas Subterráneas.
- CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2004). “Estudio técnico y ambiental sobre el cumplimiento de obligaciones ambientales del sitio de disposición final de residuos en Navarro. Santiago de Cali, Colombia”. Informe Técnico.
- CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2006). “Análisis y evaluación de ensayos de bombeo en la zona plana del departamento del valle del cauca para la determinación y zonificación de parámetros hidrogeológicos”, Informe Subdirección de Gestión Ambiental – Grupo de Aguas Subterráneas.
- CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007a). “Balance oferta – demanda de agua superficial Cuenca del río Cañaveralejo” Dirección Técnica Ambiental – Grupo de Recursos Hídricos.
- CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007b) “Balance oferta – demanda de agua superficial Cuenca del río Meléndez” Dirección Técnica Ambiental – Grupo de Recursos Hídricos.
- CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2007c) “Balance oferta – demanda de agua superficial Cuenca del río Lili” Dirección Técnica Ambiental – Grupo de Recursos Hídricos.
- CVC-PMC (2005) Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, “Caracterización y modelación matemática del río Cauca - PMC Fase II” - Convenio Inter administrativo 0168 de Noviembre 27 de 2002. Red Geodésica de Alta Precisión (Tramo Salvajina – La Virginia). Vol 1. Universidad del Valle- Colombia.
- CVC-PMC (2006) Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, “Caracterización de Ríos Tributarios del Río Cauca Tramo Salvajina - la Virginia- PMC Fase I” - Convenio Inter administrativo 0168 de Noviembre 27 de 2002. Red Geodésica de

- Alta Precisión (Tramo Salvajina – La Virginia). Vol 4. Universidad del Valle-Colombia.
- CVC-REGLA-AS - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2009). “Reglamentación integral para la Gestión de las aguas subterráneas en el Depto. del Valle del Cauca - Propuesta Actualización Acuerdo CVC – N° 20 de 1979”.
- DAPM-CON-05 (2005) “Estudio de Hidrogeología – Área Con Régimen Diferido De Navarro (ARDN)” Departamento Administrativo De Planeación Municipal – Alcaldía De Santiago De Cali. Colombia.
- Decreto 1575 (2007). “Por el cual se establece el sistema de la protección y control de la calidad del agua par consumo humano”. Ministerio de la Protección Social, Republica de Colombia. Bogota. Colombia.
- Doorenbos, J. Y Pruitt, W.O. (1976). “Las necesidades de agua de los cultivos”. FAO. Serie Riego y Drenaje. Tomo 24.
- EMSIRVA (2002). Relleno sanitario transitorio Navarro: obras de cierre. Santiago de Cali, Colombia. Pág. 1 – 16 (Subgerencia de disposición final).
- EPA- U.S. Environmental Protection Agency (1975). “Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites”. Report SW-168. Cincinnati, Ohio. USA.
- EPA - U.S. Environmental Protection Agency (2001). “A Citizen’s Guide to Permeable Reactive Barriers”. Report (EPA 542-F-01-001S). Pennsylvania Ave., NW Washington, DC, USA.
- Espinoza, C. (2006). “Guías Curso de modelación numérica de aguas Subterráneas” Universidad de Chile - Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil Santiago – Chile.
- ESRI. ArcGIS 9.2®, 2007. <http://www.esri.com/index.html>.
- Fernández., T., M., A. (2004) “Tesis Doctoral: Estudio y modelización de la contaminación del acuífero del río Najerilla. Aplicación de la microextracción en fase sólida para la determinación de los contaminantes”. Universidad de la Rioja. España.
- Fetter, C. W. (1999). “Contaminant hydrogeology”. Prentice Hall. Inc., New Jersey. USA.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D’Elia, M. y Paris M. (2003). “Protección de la Calidad del Agua Subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales, ISBN: 84-8476-146-0, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial, 1818 H Street, N.W. Washington, USA.
- Fraile, J., Galofré, A., Escuder, R., Pastor, J. (2009). “Balance y Ciclo Hidrológico”. En: Hidrogeología. Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Editor: Comisión

- Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall Inc, 604 pp.
- Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K.R., (1992). "A critical review of data on field scale dispersion in aquifers". Water Resources Research, 28(7): 1955-1974.
- Hermelin, M. (1987). Bases de Geología Ambiental. Universidad Nacional de Colombia (seccional Medellín). Medellín. Colombia.
- Herráez Sánchez de las Matas I.; Monterroso Pérez L.; Gallego López S. Barea Luchena J. (2001). Pasado, presente y futuro de la gestión de los residuos urbanos y sus implicaciones en la contaminación de las aguas subterráneas: el ejemplo del centro de tratamiento de Colmenar Viejo. En: Investigación, gestión y recuperación de acuíferos contaminados. A. Ballester Rodríguez, J. Grima Olmedo, J.A. López Geta, L. Rodríguez Hernández (Editores). Instituto Geológico y Minero de España. Páginas 221:230.
- IHOBE. (2000) "Investigación de la contaminación del suelo. Guía metodológica de análisis de riesgos: migración y seguimiento de contaminantes en el suelo y en las aguas subterráneas". IHOBE, S.A., Sociedad Pública de Gestión Medioambiental del Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.
- INGEOMINAS (2003). Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental. "Informe Respuesta Sísmica del Subsuelo en el Sector de Navarro – Cali - Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali - Convenio N° 02 de 2002, subproyecto de geología. Bogotá. Colombia.
- INGEOMINAS (2005). "Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental. "Informe No. 2-1 Investigaciones Geológicas y Geomorfológicas. Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali - Convenio N° 02 de 2002, Subproyecto de Geología". Bogotá. Colombia.
- Jaramillo J. (2002). "Guía Para El Diseño, "Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales - Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones". Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima-Perú.
- Keiser, J. (1954). "Contribución al conocimiento de la Cordillera Occidental. La geología de flanco oriental de la Cordillera Occidental en la región de San Antonio, Municipio de Jamundí, Valle del Cauca. Informe 1046 (Inédito)", INGEOMINAS. Bogotá. Colombia.
- Konikow, L. F., Goode, D. J., Hornberger, G. Z. (1996). "A three-dimensional method of characteristics solute transport model (MOC3D)" U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 96-4267. USA.

- López Gutiérrez J., Grima Olmedo J., Ballesteros Navarro B. (2002). Metodología para la elaboración de los estudios hidrogeológicos requeridos en la tramitación de permisos de vertidos de aguas residuales al terreno. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia. También en: [http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfs/art\\_3linea10.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfs/art_3linea10.pdf)
- Martínez D., Massone H., Cerón García J., Farenga M., Ferrante A. (2002). Hidrogeoquímica del área de disposición final de residuos de Mar del Plata, Argentina. Groundwater and Human Development. Bocanegra E – Martínez D – Massone H (Eds). ISBN 987-544-063-9.
- McDonald, M., Harbaugh A. (1984). MODFLOW, A modular three- dimensional finite difference ground-water flow model. U. S. Geological Survey, Open-File Report 83-875, Chapter A1, Washington, DC, USA.
- MacFarlane, J.A. Cherry, R.W. Gillham and E.A. Sudicky (1983). Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study. 1. Groundwater flow and plume delineation. *Journal of Hydrology*. 63:1-29.
- Min-Ambiente Colombia (2002). “Guía ambiental para rellenos sanitarios”. Ministerio de Medio Ambiente Colombia. Bogota D.C. Colombia. Pag 58.
- Moreno, A., Gárfias, J., Morales, P. (2004). Transporte de lixiviado proveniente de un basurero en un acuífero superficial areno-arcilloso, Metepec, Estado de México. T4-33. Congress XXXIII IAH - 7° ALHSUD Groundwater flow understanding: from local to regional scales. Zacatecas City, México. Proceedings + CD.
- Naft, D. L.; Morrison, J.; Davis, J. & Fuller, C. (2002), “Groundwater remediation using permeable reactive barriers”. Ed. Academic Press-Elsevier. Amsterdam.
- Nivia, A. (2001). “Mapa Geológico del Departamento del Valle del Cauca, Memoria Explicativa”. INGEOMINAS, Unidad Operativa Cali. Colombia.
- Pedraza R. (2008). “Guías Curso de Hidrología Superficial” Postgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos. Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe-Argentina.
- Pérez, M. (2009). “Guías Curso de Geohidrología Cuantitativa – Unidad 8” Postgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos. Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe-Argentina.
- Pollock, D.W. (1989). Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey, Open-File Report 89-381, Denver, USA.
- Ribera, F. (2009). “Calidad, contaminación y protección de acuíferos. En: Hidrogeología. Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea”. Editor: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.



- Ribera, F., Galofré, A., Teixidó, T. (2009) “Prospección Hidrogeológica. En: Hidrogeología. Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea”. Editor: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Salvato, J.A., W.G. Wilkie, and B.E. (1971) “Mead: Sanitary Landfill-Leaching Prevention and Control”. Journal Water Pollution Control Federation, Vol. N° 10.
- Sanders, L. (1998). “A manual of Field Hydrogeology. Prentice-Hall, Pag. 381.
- Sandoval. M, C. y Ramírez C. (2007). “El Río Cauca en su valle alto. Un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia”, Editorial: Universidad del Valle – Programa Editorial Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Pág 361.
- Serviambientales S.A. (2000). Unión Temporal de Empresas y Servicios y Técnicas Medio Ambientales. U.T.E Ambiental. “Estudio de localización del nuevo relleno sanitario dentro del área rural del municipio Santiago de Cali”. Diciembre de 2000. Informe de Consultoría.
- Struckmeier, W. & Margat, J. (1995) “Hydrogeological Maps: A Guide and Standard Legend”. International Association of Hydrogeologists. International Contribution to Hydrogeology. Vol. 17. Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG. Hannover.
- Tchobanoglous, G., Thiesen, H. y Vigil, S. (1994) “Gestión Integral de Residuos Sólidos” Mc Graw-Hill, Madrid, España. Vol. I.
- Thornbury, W. D. (1960). “Principios de Geomorfología”. Kapeluz, Buenos Aires.
- Vázquez Suñé, E. (1999). Easy\_Quim 4.0. Grupo de Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Vázquez Suñé, E. (2009). “Hidroquímica”. En: Hidrogeología. Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Editor: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Velásquez Ma. T. O., Cruz-Rivera R., Rojas-Valencia N., Monje-Ramírez I., Sánchez-Gómez J. (2003). “Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills” Waste Management & Research. ISSN 0734–242X Vol. 21: 127–136.
- Verdugo, G. & Nivia, A. (1985). “Reseña explicativa del Mapa Geológico Preliminar Plancha 299 – Jamundí”. INGEOMINAS. Bogotá.
- Waterloo Hydrogeologic (2005). “Visual Modflow User’s Manual” Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo. Ontario, Canadá.
- Winter T. C, Harvey J. W. O. Lehn F. y Alley W. M. (1998). “Ground Water and Surface Water A Single Resource” U.S. Geological Survey Circular 1139. ISBN 0–607–89339–7. Denver, Colorado-USA. Pag 38.

- Xu, M., Eckstein, Y. (1995). "Use of least-square method in evaluation of the relationship between dispersivity and scale". *Groundwater*, 33(6), 905-908.
- Yeh, T. C. J., Chag, J. R., Short, T. E. (1993). "An exact peak capturing and oscillation free scheme to solve advection-dispersion transport equations" *Water Resour. Res.*, 20(11), Pag. 2937 - 2951.
- Zheng, C., (1990). "MT3D: A Modular 3-D Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems". Report to the United States Environmental Protection Agency, 170 pp. (<http://www.epa.gov/ada/csmos.html>).
- Zheng, C., Bennet, G. D. (1995). "Applied contaminant transport modeling: Theory and practice" John Wiley and Son's. New York. USA.