

Análisis del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en el área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro (Santiago de Cali, Colombia)

John Jairo Márquez Molina¹ y Marcela Pérez²

¹ Facultad de Agronomía (UBA), Av. San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – (UNL), Grupo de Investigaciones Geohidrológicas, Ciudad Universitaria, Ruta Nacional 168-Km 472.4 Santa Fe, Santa Fe, Argentina.

Mail de contacto: marquezmolina@agro.uba.ar

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. Este trabajo presenta una caracterización del sistema hídrico subterráneo subyacente al área del antiguo relleno sanitario de Navarro, en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia y una simulación del posible impacto de los lixiviados generados a partir de dos de los cerros que lo componen. La representación del funcionamiento de este sistema se logró a través de los códigos numéricos Modflow, Modpath y MT3D. Para la implementación del modelo de transporte se utilizó al ión cloruro como trazador. Con el objetivo de representar posibles configuraciones de la fuente de contaminación, se definieron distintos escenarios.

Palabras Claves: relleno sanitario, simulación de flujo y transporte, Cali, Colombia

ABSTRACT

The disposal of solid waste remains, at present, a matter of great concern in a community. One of the main problems posed by the sites where the waste is dumped involve the groundwater quality of the area adjacent to them. This paper presents a characterization of the underlying groundwater system of the former landfill area of Navarro, Santiago de Cali city, Colombia, and a simulation of the possible impact of leachate generated from two of the hills that compose it. The representation of the aquifer system behaviour is achieved by Modflow, MODPATH and MT3D numerical codes. For the implementation of the transport model chloride was used as a tracer. In order to represent possible configurations of the source of contamination, different scenarios were defined.

Keywords: landfill, flow and transport model, Cali, Colombia.

Introducción y Objetivos

La ciudad de Cali, localizada al suroccidente de Colombia en el departamento del Valle del Cauca, tiene una población de 2.400.000 habitantes y genera, aproximadamente, unas 1.800 toneladas diarias de residuos sólidos. Estos residuos fueron dispuestos durante 39 años (desde 1969 hasta julio de 2008) en un basurero a cielo abierto conformado por varios vasos. En particular, la localización, adecuación y operación de dos de ellos, el Antiguo y el de Hospitalarios (Figura 1), se produjo sin tener en cuenta factores tales como el tipo de residuos y características hidrogeológicas del medio receptor. De acuerdo a lo informado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), a partir de ellos se han evidenciado serios impactos sobre la calidad de las aguas subterráneas y superficiales del sector.

Cabe destacar que el relleno sanitario se encuentra localizado junto a un antiguo paleocauce del río Cauca y sobre uno de los mantos acuíferos de mayor disponibilidad de agua subterránea para el desarrollo de la ciudad. Este manto presenta un grado de vulnerabilidad a la contaminación alto debido al poco espesor de la zona no saturada y a la presencia de niveles freáticos someros.

Además de lo expuesto, es importante considerar la conexión hidráulica existente entre el paleocauce (localmente conocido como "madrevieja") y el acuífero, y la interrelación entre el acuífero y el río Cauca. Este río, ubicado al este de la zona de estudio, abastece al 70 % de los habitantes de la ciudad de Cali. Su toma se encuentra localizada 7 Km aguas abajo del relleno sanitario de Navarro.

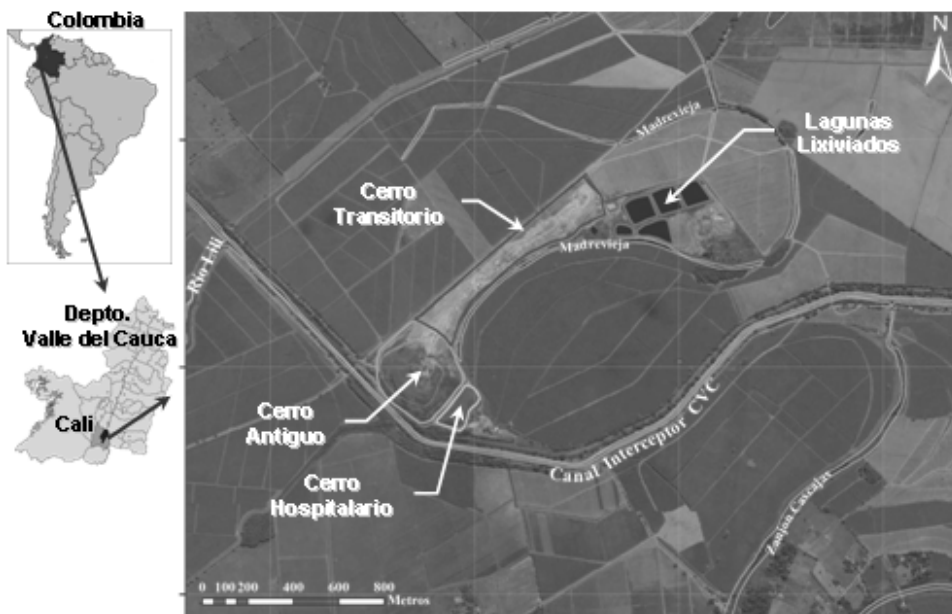


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

El objetivo del presente trabajo fue caracterizar al sistema hídrico subterráneo subyacente al área del Antiguo Relleno Sanitario de Navarro y evaluar la respuesta de este sistema a los lixiviados producidos por el antiguo vertedero de residuos sólidos.

La respuesta del sistema se evaluó a través de los resultados obtenidos al implementar un modelo numérico de flujo y transporte.

Metodología

La información básica y los estudios antecedentes del área de caso fueron proporcionados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Estos fueron complementados con informes técnicos de entidades nacionales y municipales con competencia en el área y la temática (CVC, 2001; INGEOMINAS, 2003 y DAPM-CON-05, 2005).

Características generales del área de estudio

El relleno sanitario del Municipio de Cali, conocido popularmente como “Basurero de Navarro”, está ubicado en el corregimiento del mismo nombre, al sur oriente de la ciudad, a una altura de 990 m.s.n.m, en el valle geográfico del río Cauca, sobre su margen izquierda. Limita al sur-este con el Canal Interceptor Agua Blanca, al nor-oeste y al nor-

este con cultivos de caña de azúcar y al suroeste con un predio de CVC contiguo al canal interceptor (Figura 1).

Este relleno tiene un área total aproximada de 40 ha las cuales han sido ocupadas para la disposición de residuos en forma de cerros. Este conjunto de cerros está conformado por un botadero antiguo y una serie de rellenos sanitarios transitorios contiguos al primero (Figura 1). El vertedero antiguo está constituido por dos cerros denominados cerro “Antiguo”, que ocupa una superficie de 18 ha y posee una altura de 52 m y el cerro “de Hospitalarios” con una superficie de 2 ha. Ambos cerros operaron desde 1970 hasta el 2001, sin impermeabilización en su base. Por su parte el relleno transitorio fue diseñado y construido con todas las especificaciones técnicas requeridas, incluyendo el sistema de drenaje para la recolección de los lixiviados y lagunas para su almacenamiento. Sin embargo, en algunas ocasiones se producen derrames originados por la colmatación de las mismas debido al volumen de lixiviado producido por los residuos depositados en los cerros.

Con respecto a las características climáticas del área de estudio, la precipitación media anual, para el período 1993 – 2012, resultó de 1363 mm/año y la evapotranspiración real de 1103 mm/año. La aplicación de un balance

hídrico permitió estimar un valor de recarga potencial del orden del 20% de la precipitación. La temperatura media anual es cercana a los 25 °C.

Características geológicas e hidrogeológicas

La zona de estudio se ubica en un sector plano con pendientes del orden del 2% a 3%. Geológicamente está conformada por depósitos aluviales cuaternarios (Qal), que fueron aportados principalmente por el Río Cauca y por otros tributarios como el Río Pance, Meléndez y Lili. Estos depósitos presentan gran variedad en su composición y tamaño. Su litología es diversa: arcillas, limos, arenas medias y finas, además de gravas, mezcladas en diferentes proporciones o en ocasiones en estratos bien definidos. La organización en el terreno de estos depósitos ha obedecido a 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 (INGEOMINAS, 2003). En la figura 2a se presenta en mapa geológico de superficie de la zona de estudio.

Estudios hidrogeológicos antecedentes identifican en el área un depósito aluvial, denominado **Acuífero del Cauca**, compuesto por dos niveles acuíferos (Unidades A y C), y un nivel hidráulicamente acuícluido (Unidad B). Estos niveles se encuentran claramente localizados y poseen características bien definidas. La Unidad A es la que reviste interés a los fines de este estudio. 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. Tiene una potencia que varía entre 28 y 83 m. Las capas acuíferas de esta unidad son, principalmente, libres y semiconfinadas con rendimientos específicos de entre 1 y 10 l/s/m. El sentido general del escurrimiento es de oeste a este; esto es desde la cordillera Occidental hacia los conos aluviales, actuando el río Cauca como área de descarga. Pruebas hidráulicas llevadas a cabo en la zona dan cuenta de la heterogeneidad de los materiales del subsuelo. Se han estimado valores de conductividad hidráulica del orden de 3 m/día, para el sector Oeste, alcanzando en el sector Este, en las inmediaciones del Río Cauca un valor de 51 m/día. El almacenamiento específico (S_s) se estimó en 0,019.

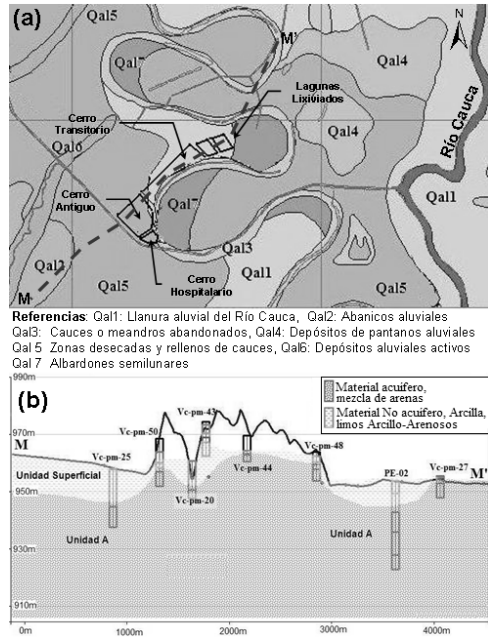


Figura 2. (a) Geología de la zona de estudio, (b) corte estratigráfico M-M'

Implementación del modelo numérico de flujo

Para implementar el modelo de flujo se empleó el programa computacional Modflow (Mc Donald y Harbaugh, 1984), en su versión Visual Modflow 4.1 (Waterloo Hydrogeologic, 2005).

El dominio del sistema contempló un área de 18 Km², la que fue discretizada en celdas de tamaño variable, iniciando en las zonas de frontera con tamaños de 100m x 100m, finalizando, en las inmediaciones del relleno con tamaño de celdas de 20 m x 20 m. Todas aquellas celdas que se encontraban fuera del dominio se asignaron como inactivas. Para esta implementación numérica se consideraron dos capas (Figura 3a). La primera es una capa limo-arcillosa cuyo límite superior lo constituye la topografía del terreno y posee un espesor de entre 2 y 8m de profundidad. La segunda capa, de principal interés, está conformada por arenas gruesas y gravas finas bien seleccionadas. Se representa con espesores variables y su base queda definida por el techo de una potente capa arcillosa (Unidad B).

El dominio del modelo se alineó de acuerdo a la dirección predominante del flujo subterráneo y a las condiciones de borde principales (Figura 3b). Por tal motivo la grilla del modelo se giró un ángulo de 27° en sentido

antihorario. Al borde *Oeste* se le asignó una condición del tipo “*altura contante*” coincidente con la equipotencial 959 m.s.n.m. Para el borde *Este* se asignó la condición de borde tipo “*riío*”, en coincidencia con la presencia del nivel del agua en el río Cauca, cuyos valores fueron obtenidos de las estaciones limnigráficas sobre el río Cauca. Los límites *Norte* y *Sur* fueron considerados como de “*no flujo*”. En el interior del dominio se consideró la presencia de una condición de borde mixta, en coincidencia con los cuerpos de agua superficiales existentes en la zona (paleocauces con presencia de agua en superficie).

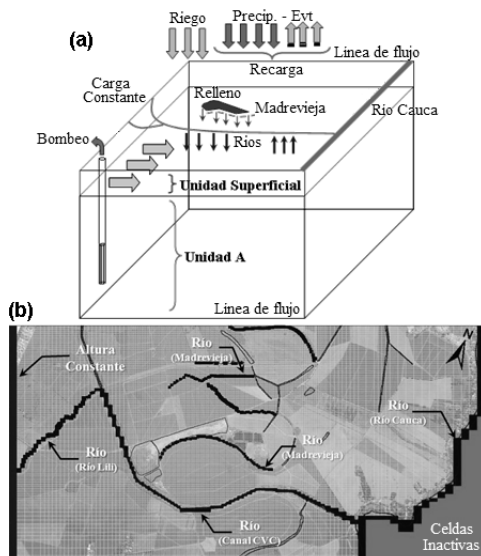


Figura 3. (a) modelo conceptual propuesto. (b) dominio del modelo y condiciones de frontera.

Calibración del modelo

El modelo se calibró en régimen permanente. Siguiendo los criterios establecidos por Anderson y Woessner (2002) se seleccionó como tiempo inicial de la simulación un periodo en el cual los niveles estáticos fueron estables, no se presentaron eventos hidrológicos extraordinarios ni tampoco bombeos excesivos en pozos cercanos al relleno. Para la comparación de los datos observados y calculados se utilizaron 20 pozos de observación, localizados principalmente en el entorno perimetral del relleno sanitario.

Para alcanzar una adecuada calibración fue necesario realizar el ajuste de los parámetros inicialmente asignados. Los principales ajustes se realizaron sobre la K_{sat} de la capa 2, re-

asignando valores y distribuciones espaciales en los sectores *Oeste* y *Nor-Este* del dominio.

En cuanto a la recarga, se definió sobre los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*, un valor adicional de 252 mm/año producto del domo observado en el mapa de isopiezas (producido por la precipitación, la humedad de los residuos y recirculación de los lixiviados generados en dichos cerros).

El proceso de calibración del modelo de flujo culminó al obtener un error medio cuadrático estandarizado, $RMS = 4,39\%$ y un coeficiente de correlación de 0,993.

Para la evaluación de esta calibración se recurrió al balance de masas, obteniendo una diferencia entre flujos de entrada y salida de $46 \text{ m}^3/\text{día}$, equivalente a una discrepancia de 0,21%. Por lo que se asumió que se había alcanzado una buena representación del modelo conceptual para simular los distintos escenarios de transporte.

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 balance de masas para cada una de las situaciones planteadas.

Simulación de transporte de partículas

Con el objetivo de disponer de una aproximación inicial de la posible trayectoria de los lixiviados en el acuífero se implementó el código de seguimiento de partícula denominado *Modpath* (Pollock, 1989).

Las partículas que se asignaron con este utilitario fueron dispuestas alrededor de los cerros *Antiguo*, *Hospitalario* y en el paleocauce (*madrevieja*) que bordea el relleno sanitario, por ser consideradas las fuentes de contaminación del área.

Implementación del modelo de transporte

Para la implementación del modelo de transporte se utilizó el código MT3D (Zheng, 1990), seleccionando el método de diferencias finitas (*FDM*) desarrollado por Zheng y Bennett (1995) para la resolución del sistema de ecuaciones correspondientes.

Para simular los efectos de los dispersión hidrodinámica en la zona de estudio, se considero como unitario el coeficiente de difusión molecular del medio, para la estimación de la dispersividad longitudinal (α_L) se utilizó la expresión propuesta por Xu y Ecksteins (1995), estimado una $\alpha_L=12$ m, por su parte las dispersividades transversal (α_T) y vertical (α_V), se establecieron según los criterios propuestos por Gelhal et al (1992), considerando a estas función de la α_L , a través de las siguientes proporciones: $\alpha_T = 0.1\alpha_L$ y $\alpha_V = 0.01\alpha_L$.

Escenarios de transporte

Con el fin de representar las posibles situaciones originadas por el agua percolada desde las fuentes de contaminación (cerros *Antiguo* y *Hospitalarios*, paleocauce y lagunas de lixiviados), se propusieron 5 escenarios, los cuales fueron establecidos con base a la identificación de la potenciales fuentes de contaminación, comprobadas en la evaluación de los tenores de concentración de Cl⁻ y conductividad eléctrica en los pozos perimetrales y cuerpos de agua cercanos del relleno sanitario, los valores iniciales en cada escenario, se establecieron con los resultados de las muestras obtenidas en los pozos de monitoreo y muestras tomadas sobre el paleocauce y lagunas de lixiviados.

El elemento utilizado como trazador para la representación de la pluma de contaminación fue el cloruro. El frente de la misma se consideró para una concentración de cloruros (C) de 10 mg/l, equivalente al fondo natural de este ión en la zona de estudio. El tiempo de simulación (t) fue de 100 años.

Para los escenarios 1, 2 y 3 se consideró que la base de ambos cerros constituía una fuente de ingreso de concentración constante. La concentración inicial de la misma fue de 524 mg/l. No obstante, para los escenarios 2 y 3 se consideró una atenuación del ingreso de cloruro en 100 años y en 50 años, respectivamente.

El escenario 4 plantea como fuentes de ingreso de contaminación a ambos cerros y al paleocauce contiguo al relleno sanitario. Para esta última fuente, la concentración inicial fue de 1470 mg/l.

Finalmente, el escenario 5 considera, además de las fuentes anteriores, una posible fuga desde el fondo de las lagunas de almacenamiento de los lixiviados a partir del año 30 del período de simulación. La concentración inicial asignada para esta fuente fue de 2200 mg/l.

Resultados, Análisis y Discusión

El modelo de flujo implementado representa adecuadamente la configuración general de las líneas equipotenciales del área para la condición inicial considerada. Las velocidades de escurrimiento estimadas son coincidentes con las reportadas en informes hidrogeológicos antecedentes. Las mismas se encuentran en el orden de los 0,04 m/día, para el sector Oeste del área. 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.

De acuerdo al balance de masa general, las entradas a este sistema se producen a través de las condiciones de borde de recarga (54%), río (33%) y carga constante (13%). Mientras que la salida más significativa se da a través de la condición de borde definida como río (99%). La baja discrepancia obtenida entre los flujos de entrada y salida confirma la buena representación obtenida del sistema acuífero.

La implementación del modelo para el seguimiento de la trayectoria de las partículas, mostró la alta posibilidad de que un contaminante que ingresó al acuífero por la base de los cerros *Antiguo* y/u *Hospitalario* llegue a la *madrevieja*, indicando claramente la incidencia de la misma como potencial zona receptora del flujo proveniente de los cerros. Por su parte, las partículas asignadas en el tramo final del paleocauce, tienen como destino final el río Cauca.

En la Figura 4, se observan los resultados tanto del modelo de flujo como del seguimiento de partículas en la zona de estudio.

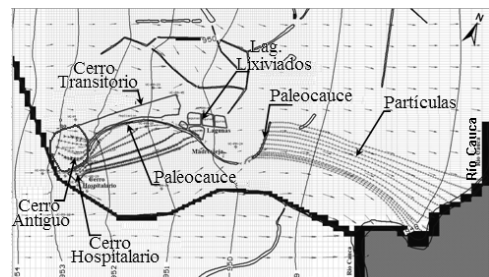


Figura 4. Resultado del modelo de flujo y seguimiento de partículas.

Los resultados obtenidos con el modelo de transporte se analizan para los distintos escenarios planteados.

Escenario 1

La pluma de contaminación originada para el escenario 1 presenta, en la base de los cerros, concentraciones que van desde 261 mg/l ($t = 25$ años) a 327 mg/l ($t = 100$ años). En profundidad, las mayores concentraciones se dan a los 10 m (524 mg/l). En los primeros años de simulación ($t = 10$ años) se produce un avance preferencial del frente de la pluma hacia la *madrevieja*, alcanzando hacia el final del período una extensión de 1200 m y una profundidad de 50 m ($C = 10$ mg/l). En la Figura 5a, se puede observar la configuración de la pluma para $t = 100$ años.

Escenario 2

En este escenario se evaluó el ingreso de cloruro al acuífero con una disminución gradual de su concentración durante los 100 años de simulación. En este caso, y para $t = 25$ años, la concentración máxima en la base de los cerros fue de 136 mg/l. A partir de $t = 60$ 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. Para $t = 70$ años (Figura 5b) la concentración promedio los 12 mg/l, alcanzando un desplazamiento longitudinal de 1300m.

Escenario 3

La Figura 5c, muestra la pluma de contaminación para $t = 60$ años, es decir luego de 10 años de detenido el ingreso de cloruros desde las bases de los cerros. La concentración promedio de esta pluma residual es de 12 mg/l, y su desplazamiento de unos 900 m desde la fuente de ingreso.

Escenario 4

En el escenario 4 se contempló al paleocauce continuo al relleno sanitario como otra fuente adicional de contaminación. La Figura 6a presenta el período final de simulación ($t = 100$ años), para el cual se han generado 2 plumas de contaminación: la primera proveniente de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*; y la segunda tiene su origen en el sector *Este* del paleocauce, con dirección a las inmediaciones del Río Cauca.

Las máximas concentraciones para ese período se dan en el sector del paleocauce, a una profundidad de 20 m ($C = 500$ mg/l).

En la vista transversal, Figura 6b, se observa que la pluma alcanza, sobre este sector, una profundidad máxima de 76 m y una longitud total de 2700 m.

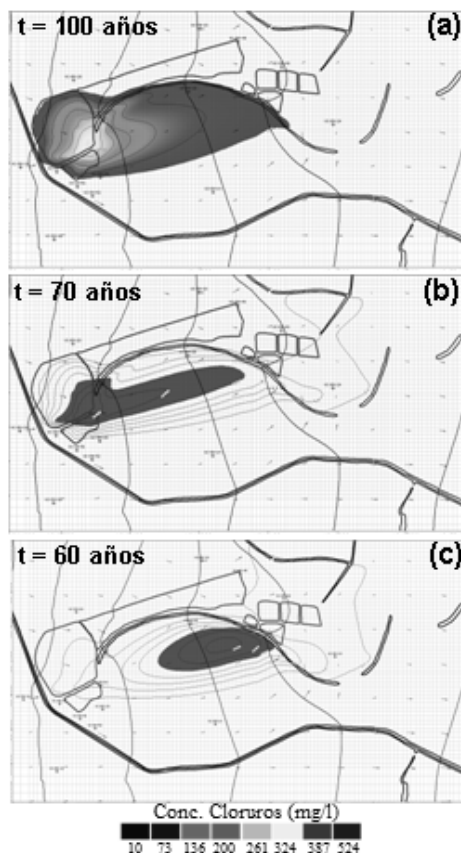


Figura 5. (a) Escenario 1 – 100 Años de simulación. (b) Escenario 2 – Atenuación en 100 años. (c) Escenario 3 – Atenuación en 50 años

Escenario 5

Para el último escenario simulado se consideró, además, una posible fuga producida desde las base de las lagunas de almacenamiento de lixiviado (puntos A y B), la que tendría lugar a partir del año 30.

La Figura 7a presenta los resultados obtenidos para un tiempo de simulación $t = 50$ años. En ella se aprecia el comportamiento diferencial de la pluma, tanto para el sector de la base de los cerros, como el paleocauce y las lagunas.

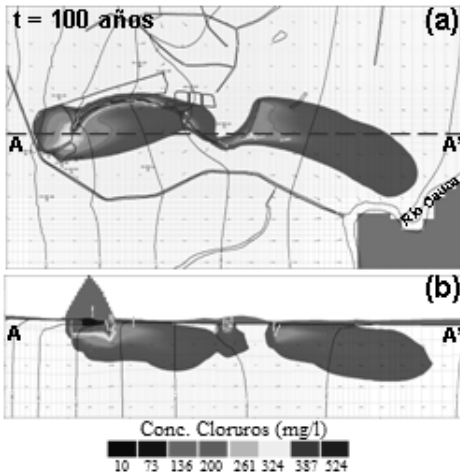


Figura 6. (a) Escenario 4 – Fuente contaminante en cerros y paleocauce. (b) Escenario 4 – Vista transversal.

La pluma generada en la base de los cerros presenta un frente de avance hacia el paleocauce.

En los puntos A y B (lagunas de almacenamiento de lixiviados) se generan dos plumas de contaminación. Cabe destacar que la generada en el punto A descarga en la *madrevieja*, indicando la importancia de dicho cuerpo de agua como vía preferencial de propagación.

Por su parte, en la Figura 7b se puede observar que, para un periodo de simulación de 100 años, la pluma originada en la base de las lagunas (punto B) adquiere dirección *Este*, alcanzando una longitud máxima de 530 m.

Conclusiones

La realización de este trabajo puso de manifiesto la importancia que reviste un buen conocimiento hidrogeológico del área de emplazamiento de un relleno sanitario. 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.

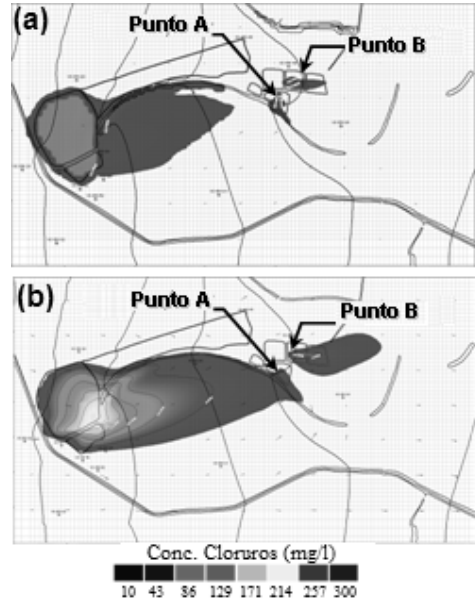


Figura 7. (a) Escenario 5 – tiempo de simulación 50 años. (b) Escenario 5 – tiempo de simulación 100 años

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 este trabajo fue la *Unidad A*.

Para la representación de la posible trayectoria del agua percolada a través de los residuos depositados en el relleno de Navarro, se implementó un modelo matemático hidrogeológico, bajo la condición de régimen estacionario. Esta herramienta permitió representar con fidelidad el funcionamiento hidrodinámico del área de estudio.

Se identificó como 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.

Respecto a los escenarios de transporte propuestos, los tres primeros contemplaron como única fuente de ingreso del contaminante la base de los cerros *Antiguo* y *Hospitalario*. A pesar de las diferencias existentes entre los tres escenarios respecto al modo de ingreso de la fuente de cloruros al sistema hídrico subterráneo, los tres mostraron que, en los primeros años de simulación, 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 propia *madrevieja*. Esta posibilidad estaría indicando que la calidad del agua subterránea que descarga en el río podría verse afectada. Esta posibilidad debe ser tenida 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.

Se estima que los resultados alcanzados en con este trabajo 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.

Agradecimientos

Al Grupo de Aguas Subterráneas de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por la información proporcionada.

Referencias

Anderson M. P. y Woessner W. W. 2002. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press Inc., San Diego, California.

CVC - Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. 2001. *Impacto del Basurero*

de Navarro sobre la calidad de las aguas subterráneas. Informe de la Subdirección de Gestión Ambiental. Grupo de Aguas Subterráneas.

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.

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.

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.

McDonald M. y 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

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.

Waterloo Hydrogeologic, Inc. 2005. *Visual Modflow User's Manual*. Waterloo. Ontario, Canadá.

Xu, M., Eckstein, Y. (1995). "Use of least-square method in evaluation of the relationship between dispersivity and scale". *Groundwater*, 33(6), 905-908.

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/csamos.html>).

Zheng, C. y Bennet G. D. 1995. *Applied contaminant transport modeling: Theory and practice*. John Wiley and Son's. New York. USA.