

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la Formación Chuy, en la franja costera del Este del Uruguay, fronteriza con Brasil

L. Almagro⁽¹⁾⁽²⁾ y E. Custodio⁽²⁾

(1) Aluvial Consultoría y Modelación Hidrogeológica S.L. Avda. Mistral 61. 08015 Barcelona.

(2) Departamento de Ingeniería del Terreno, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, C/ Gran Capitán, s/n. Ed. D2. 08034 Barcelona (España).
E-mail: emilio.custodio@upc.es

RESUMEN

El Chuy es la región situada junto al litoral Atlántico, al Este del Uruguay y límite al Norte con Brasil. Se trata de una planicie litoral que se abre progresivamente hacia el Noreste, en Brasil, y que en Uruguay tiene su extremo sur. El territorio consiste en una ligera elevación arenosa, con dunas costeras, bordeada por amplios bañados, que en el Chuy están limitados al Norte, Oeste y Sur por afloramientos rocosos impermeables del zócalo cristalino y volcánico. Se considera como acuífero principal las arenas superiores que forman la Cuchilla de la Angostura. Son el resultado de la sucesión de ciclos de barras litorales y lagunas sobre una planicie de baja pendiente. El nivel freático es relativamente poco profundo y aflora en pequeños humedales y en el límite con los bañados. El agua subterránea es en general dulce y de buena calidad, y es la única fuente de abastecimiento a la población urbana y rural. A pesar de la homogeneidad litológica y de la baja reactividad química de los componentes minerales, hay diferencias hidrogeoquímicas en el área, en función de cambios en la evapoconcentración de la lluvia infiltrada y de la presencia o ausencia de restos carbonatados fósiles y de agua marina en las formaciones afectadas. Esto permite distinguir entre los distintos componentes geológico-geomorfológicos presentes en el área.

Palabras clave: acuífero costero, arenas, Cuaternario, Chuy, hidrogeoquímica, Uruguay

Hydrochemical characterization of the Chuy Formation groundwater, coastal strip of Eastern Uruguay, limiting with Brasil

ABSTRACT

The Chuy is the region at the Atlantic littoral side of Eastern Uruguay, limiting to the North with Brasil. It is a littoral plain that progressively opens towards the Northeast, in Brasil, and that has in Uruguay its Southern end. The landscape consists of a gently sandy elevation, with coastal dunes, and bounded by wide marsh areas. In the Chuy they are limited to the North, West and South by the crystalline and volcanic impermeable bedrock outcroppings. Here the upper sands are considered the main aquifer, which forms the Cuchilla de La Angostura; it is the result of littoral bars and lagoons formed by successive events and resting on a gently sloping plain. The water table is relatively shallow and outcrops in small wetlands and in the limit with the marshes. Groundwater is generally fresh and of good quality, and it is the unique water supply resource for the urban and rural population. In spite of the litological homogeneity and the low chemical reactivity of mineral components, there are hydrochemical differences which depend on the different evapoconcentration effects on infiltrated rainfall, and on the existence or lack of carbonate and marine water remnants in the involved formations. This allows distinguishing the various geological-geomorphological components existing in the area.

Key words: coastal aquifer, Chuy, hydrogeochemistry, Quaternary, sands, Uruguay

Introducción

A lo largo de la costa Atlántica sudamericana, desde Montevideo hasta Porto Alegre, se desarrollan un conjunto de llanuras costeras en materiales no con-

solidados, de importancia creciente de S a N, sobre las que se asientan poblaciones y actividades agropecuarias importantes. Aquí las aguas subterráneas son la principal, cuando no la única fuente de agua potable para abastecimiento. En principio estos acuí-

feros responden a condiciones relativamente sencillas, aunque pueden presentarse variaciones importantes en los balances hídricos y en la calidad del agua subterránea cuando se los considera en detalle. A pesar de la gran importancia local de esos acuíferos, se han realizado escasos trabajos hidrogeológicos de detalle, en contraste con la relativa abundancia de estudios y obras superficiales de envergadura que vienen desde el primer cuarto del siglo XX y cuyo objetivo era posibilitar la colonización de las grandes áreas de encharcamiento permanente y temporal para cultivos y ganadería.

El Chuy, que se describe a continuación, es un área costera y fronteriza entre Uruguay y Brasil (Fig. 1). En

ella se ha dispuesto de información parcial de detalle en el área uruguaya, y algunos datos del área brasileña. Esto permite abordar una caracterización hidrogeológica y establecer un modelo conceptual bien soportado del funcionamiento de las aguas subterráneas. Se trata de un contexto hidrogeológico que se repite en otros lugares de la Costa Atlántica Sudamericana y también al otro lado del océano, por lo que se espera que este artículo pueda ser utilizado como fuente para establecer otros modelos conceptuales.

Se han empleado técnicas hidrogeológicas convencionales en condiciones de información incompleta, incluso geológica (solo se disponía de un mapa

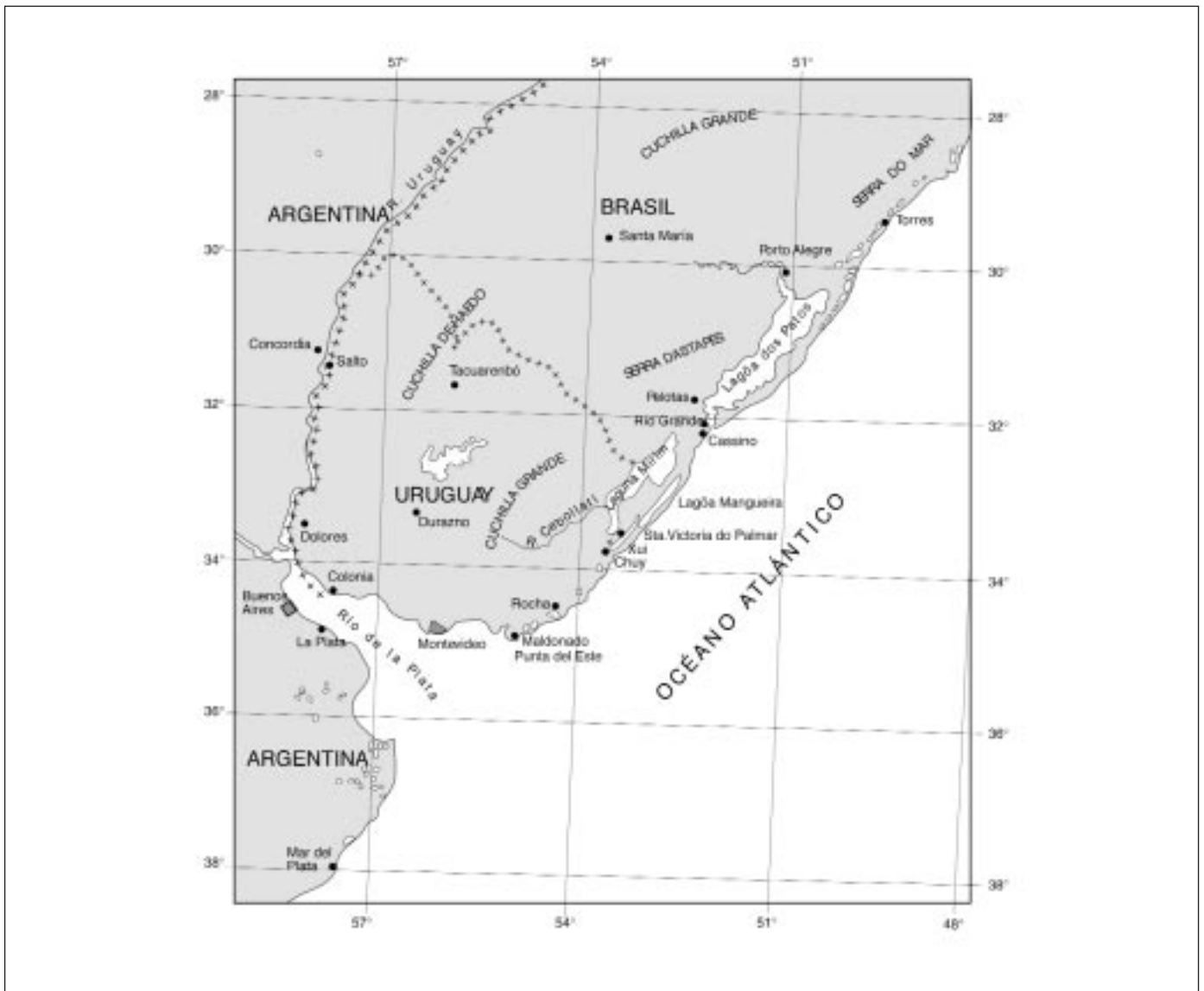


Fig. 1. Mapa general de situación en el contexto del Cono Sur de Sudamérica
Fig. 1. General situation map with respect to the Southern Cone of South-America

a escala 1/500.000), y con muy escasos antecedentes en la parte de Uruguay. Se trata así del primer trabajo de base (Almagro, 2001) que aborda la hidrogeología de este área transfronteriza, en la que el agua subterránea juega un doble papel. En primer lugar es esencial para la población. En segundo lugar es un importante recurso para el desarrollo del área, por lo que se requiere ya en este momento una racionalización del uso del agua mediante una gestión cuidadosa que lo haga sustentable.

Características del área de estudio

El área de estudio que aquí se expone se emplaza al Este de Uruguay (fig. 2), en el Departamento de Rocha, en una región de bañados lindante con Brasil y con el Océano Atlántico. Se entiende por bañado un área llana que está con frecuencia encharcada con una pequeña lámina de agua o que tiene el suelo saturado. Es un humedal de agua dulce. Esta región de Bañados del Este representa una importante reserva biológica de Uruguay y contiene extensos humedales, como los Bañados de Las Maravillas, San Miguel y La Barrita, que suponen en Uruguay casi el 20% de los 3250 km² incluidos en el Registro de Humedales Montreaux en 1990. Desde principios del siglo XX se han realizado en ellos acciones para el

drenaje y aprovechamiento ganadero y el cultivo del arroz, entre ellas un gran canal de drenaje (Canal Andreoni), que cruza de NNO a SSE.

Entre estos bañados y el mar existe una suave elevación, denominada Cuchilla de la Angostura, que es el área de principal interés de este trabajo. Es donde se encuentra la reserva de agua dulce más importante para el desarrollo económico del área y en ella se localiza la mayor extracción de agua subterránea actual.

El área general de estudio se sitúa entre las coordenadas planas X=674000 y X=725000 (X₀ a 500 km al Oeste del meridiano 62°00'), Y=6240000 e Y=6272000 (Y₀ en el Polo Sur), con una superficie de 880 km². Se trata de una extensa planicie con los bañados antes citados y la Cuchilla de la Angostura, cuya altitud es inferior a 30 m, en general entre 10 y 20 m, y disposición alargada norte-sur, y que cae al litoral atlántico mediante un escarpe (barranca) que puede alcanzar 15 m de elevación respecto a la playa actual. El área concreta de estudio que contiene los acuíferos queda entre las coordenadas X=710000 y 725000, e Y=6245000 y 6270000, con una superficie de 210 km² en Uruguay.

La población local más importante es Ciudad del Chuy, que se extiende a ambos lados de la frontera (Xui en Brasil), lo mismo que el balneario (urbanización) de Barra del Chuy (Xui). Ambas áreas urbanas

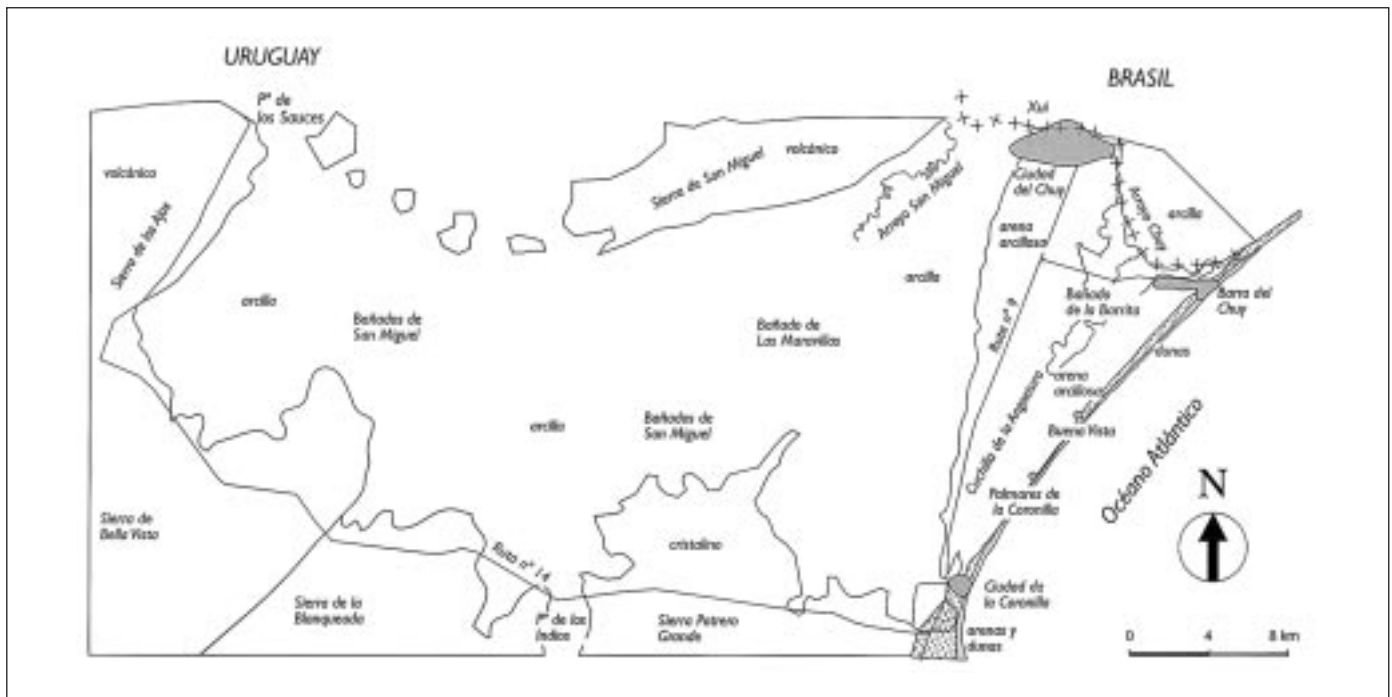


Fig. 2. Detalle de la situación del área de estudio, con indicación de los materiales dominantes en las áreas llanas
 Fig. 2. Detail of the study area situation indicating the materials that predominate in the flat areas

se abastecen por separado a través de los servicios de OSE (Obras Sanitarias del Estado, Uruguay) y CORSAN (Compañía Riograndense de Saneamiento, Brasil), que explotan intensamente numerosos pozos perforados en los niveles arenosos cuaternarios superiores, en un área relativamente reducida. Otra población importante es Ciudad de La Coronilla, al Sur del área considerada. Los territorios urbanos ocupan unos 20 km². El resto es territorio rural, dominando la ganadería, los arrozales y las plantaciones forestales. Las cifras aproximadas de población para 1996 se muestran en la tabla 1.

La planicie, que incluye los bañados, está limitada al sur, oeste y norte por pequeñas lomas y sierras rocosas (fig. 2), y está abierta al noreste, por donde se continua más de 600 km hasta la Ciudad de Torres, en Brasil, con anchura creciente.

La vegetación de los bañados está formada por malezas de porte alto y zonas con vegetación de porte bajo como grama o pasto flotante; hay turberas profundas que contienen camalotes, juncos y totora. Además se desarrollan áreas con praderas naturales con vegetación halófila, con palmares y bosques ribereños, y otros espacios forestales artificiales de eucaliptos y pinos.

El clima de la región es templado húmedo, con temperaturas medias mensuales que oscilan entre 20°C en el período estival y 11°C en invierno. La pluviometría anual oscila en el entorno de 1250 mm/año (entre 820 y 1660 mm/año), con una tendencia a ser julio el mes más lluvioso y diciembre el mes más seco. El periodo de estudio, que abarca principalmente los años 1994 a 1997, es de características próximas a las medias. Para la Cuchilla de la Angostura la evapotranspiración media se evalúa en unos 950 mm/a y la real es un valor próximo ya que casi no hay períodos con déficit hídrico. Los excedentes, de alrededor de 300 mm/a en promedio, se distribuye entre recarga a los acuíferos y escorrentía superficial y subsuperficial. No obstante, esas cifras son solo orientativas.

Marco geológico

El área de estudio (fig. 2) se emplaza en el extremo sur de la fosa que geológicamente se designa como

Población	C. del Chuy	Xui	Barra del Chuy	C. de la Coronilla	rural
Regular	10000	3000	700	1300	1200
Estival	12000	4000	5000	2200	1200

Tabla 1. Población en el área estudiada
Table 1. Population in the study area

de la Laguna Merín en Uruguay (fig. 3), y que en Brasil se denomina como Cuenca de Pelotas. Se la asocia a una importante tectónica de bloques asociada al magmatismo mesozoico. Este tiene por origen la fracturación de la corteza continental al final del Gondwana y al derrame en los bordes, previo a la subsidencia, de lavas de diversa composición. Estos eventos continuaron durante todo el Cretácico ligados a un ciclo pericratónico con fuerte actividad tectónica y posteriores fenómenos eustáticos, con reactivación de la plataforma y la formación de fosas y pilares tectónicos (*horsts*). Sobre estas lavas y ligados a fenómenos de subsidencia y adelgazamiento de la corteza se depositaron derrames ácidos no orogénicos que constituyeron un enorme filón de granofiros hipoabisales. Estos evolucionaron a riolitas y micropegmatitas (Sierras de San Miguel y de los Ajos), de edad comprendida entre los 120 y 130 Ma, y que constituye el final de la evolución del mencionado ciclo pericratónico (Bossi y Umpierre, 1975).

La Sierra de San Miguel constituye el límite NO de la zona de estudio, comportándose como un borde impermeable para el sistema acuífero considerado a lo largo de 21 km de longitud. Hacia el oeste se continúa en un arco de afloramientos alternados, de aproximadamente 13 km de longitud. Se trata de una roca masiva micragranuda de color marrón rojizo. El borde oeste del área de estudio es la Sierra de los Ajos, constituida por una sucesión de coladas superpuestas de rocas porfíricas cuarzosas, de matriz micropegmatítica.

Los depósitos sedimentarios continentales, transicionales y marinos que han recubierto la fosa desde el Mioceno hasta el presente, han formado una amplia planicie costera que en territorio uruguayo alcanza su máxima expresión hacia el noreste, con 140 m de espesor. Está limitada hacia el sur por el complejo de rocas cristalinas y hacia el oeste por secuencias volcánicas.

Estos depósitos se continúan 640 km al noreste, hacia la Ciudad de Torres, en el Estado de Río Grande do Sul, donde limitan con las rocas basálticas de la Formación Serra Geral. Presentan una superficie de afloramiento de 33.000 km² en ambos países, ocupando zonas bajas en las que se desarrolla un sistema de lagunas costeras y barreras arenosas, que se comenta más adelante.

La secuencia estratigráfica tipo de los sedimentos que rellenan la fosa ha sido determinada por diversos autores en función de dos perforaciones ubicadas en la Ciudad del Chuy, que superan los 130 m de profundidad (Tabla 2).

Existen afloramientos de rocas cristalinas a 13 km al sur de la Ciudad del Chuy y al este de la Ruta 9, que indican una estructura en pilares que interrumpe la

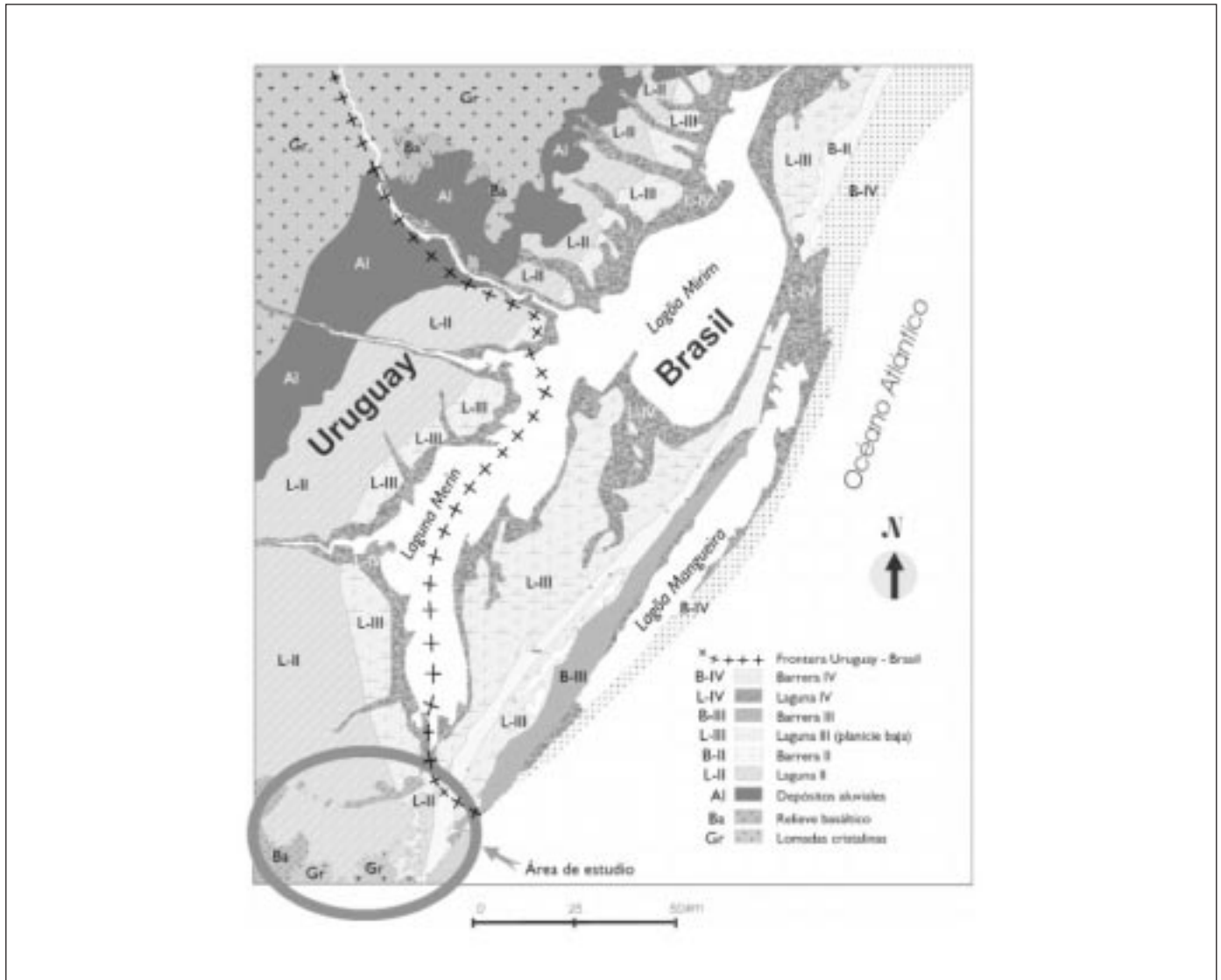


Fig. 3. Mapa geomorfológico regional, con indicación de la secuencia de islas-barrera y lagunas. Se apoya en los trabajos de Villwock (1994), Villwock y Tomazelli (1995; 1998) y en comunicaciones personales de J. Villwock

Fig. 3. Regional geomorphologic map indicating the series of island-barriers and lagoons. Based on works of Villwock (1994), Villwock and Tomazelli (1995; 1998), and personal communications with J. Villwock

continuidad de los depósitos sedimentarios que rellenan la fosa en el área de estudio. Hacia Brasil aumenta la profundidad de la fosa, encontrándose el basamento cristalino (micasquistos), en la ciudad de Cassino, 200 km al noreste del Chuy, a 520 m bajo el nivel del mar, con 552 m de cobertura sedimentaria. En Curral Alta, entre las Lagunas Merín (Mirim en Brasil) y Mangueira, se perforaron 320 m sin llegar al zócalo.

Características geomorfológicas

En el Plioceno e inicio del Pleistoceno, en la región

aquí considerada se instauró un sistema de abanicos aluviales (correlacionados con la Formación Raigón, tabla 2), que están asociados a los ambientes de tierras altas y cuya área madre corresponde a las rocas volcánicas y del basamento cristalino.

El sentido SE del oleaje provoca que los granos de arena arrastrados en la zona de rompiente, cuya línea de costa presenta una orientación NNE, sean movidos lateralmente, dando lugar a una componente de transporte a lo largo de la costa. Esta deriva litoral es un factor básico en la formación de las barras litorales.

El paisaje actual de esta región corresponde al de una extensa planicie en la que a partir del menciona-

Formación	Edad	Ma	Naturaleza	Origen	Comentarios locales	Referencias
Basamento	Paleozoico	490-550	Granodioritas y granitos con muscovita	Intrusión magmática postorogénica	Granito de Santa Teresa	Bossi (1965) Bossi y Navarro (1998)
Puerto Gómez	Jurásico		Basaltos subaéreos, microgranudos, gris oscuro	Previo a la fosa; recubre	Al SW	Eochard (1970)
Arequita	Cretácico Inf.	120-130	Micropegmatitas y riolitas	Final del ciclo pericratónico	Al N y SW (Sierra de San Miguel y serie de cerros). Al W (Sierra de los Ajos)	Bossi (1965)
Camacho	Mioceno		Arenas gruesas cuarzosas; arenas finas y limos arenosos a techo	Ingresión marina en fosa muy subsidente. Discordancia erosiva	A 113-133 m prof en Chuy. Posible agua salina	Sprechmann (1978)
Raigón	Plioceno Sup.		Arena gruesa y gravilla con pasadas arcillosas y limosas	Continental fluvio deltáico (?) Clima semiárido (?)	A 66-113 m prof. en Chuy. Posible acuífero	Francis y Mones (1975) Eochard (1970)
Chuy	Pleistoceno	0,32-0,12	Arcillas marinas de ambiente reductor y arena fina y media a techo. Acumulación marina somera progradante, de playa y eólica	Sobre planicie litoral subsidente. Sedimentos marinos someros y litorales continentales. Clima templado y húmedo. Eventos transgresivos II y III. Forman la Cuchilla de la Agostura	A 7-66 m prof. en Chuy (máxima potencia). Base del acuífero principal, que son las arenas superiores. Pendientes al SE. Vermiculitas con componentes de baja cristalinidad	Eochard (1970) Almagro (2001) Tomazelli (1985)
Coronilla	Pleistoceno		Limos arenosos y arenas limo-arcillosas	Recubre la formación Chuy	Potencia <10 m	Eochard (1970)
Dolores	Pleistoceno		Arcillas limo-arenosas	Sistema deposicional: Laguna II		Almagro (2001)
Villa Soriano	Holoceno		Arcillosa	Sistema deposicional: Laguna III		Almagro (2001)
Dunas y dep. costeros	Actual	0,005	Arenas finas	Sistema deposicional: Barrera IV. Transgresión postWürm		Almagro (2001)

Tabla 2. Formaciones características del área del Chuy. Ma=millones de años
Table 2. Characteristic formations of the Chuy area. Ma=million years

do sistema de abanicos aluviales se han desarrollado cuatro ciclos marinos transgresivos-regresivos controlados por cambios climáticos y fluctuaciones eustáticas. Cada uno de estos ciclos, de edad cuaternaria, condicionó la instalación de un sistema laguna-isla barrera, dentro del marco de rocas magmáticas antiguas bordeadas por abanicos aluviales antes indicado (Villwock y Tomazelli, 1995; 1998). En la figura 3 se dan las pautas geomorfológicas de esos cuatro ciclos en territorio brasileño (Villwock, 1994), aunque el pri-

mero de ellos no se representa ya que sólo aparece aflorando en el extremo norte, con poca extensión geográfica. La escasa pendiente de la plataforma continental ha permitido que gran parte de estas estructuras sedimentarias se hayan conservado hasta el presente. La Figura 4 es un esbozo geomorfológico del área de estudio.

El Sistema Barrera-Laguna I es el más antiguo, y ocupa los bordes de las laderas en rocas cristalinas, con altitudes medias superiores a los 100 m sobre el

nivel medio del mar actual. Se le atribuye una edad absoluta de 400 ka (Villwock, 1994), en relación con el primer evento transgresivo-regresivo del Pleistoceno. El estrato arenoso desde el Paso de los Sauces hasta los Bañados de San Miguel podría corresponder a la Barrera I (no representada en la figura 4).

El Sistema Barrera-Laguna II se asocia a un segundo evento transgresivo-regresivo, con una edad tentativa del pico transgresivo de 325 ka (Villwock, 1994). La Barrera II, de tipo micro y mesomareal sobre una plataforma continental de pendiente suave, es la que ha aislado del océano a los bañados de las Maravillas y San Miguel, así como a su continuación en territorio brasileño, que es la Laguna Merín (Laguna II). En territorio uruguayo, la Barrera II constituye la porción

Oeste de la Cuchilla de la Angostura, que presenta una disposición alargada Norte-Sur, alcanza su mayor expresión en el entorno de la Ciudad del Chuy, se extiende de forma continua al lado Este de la Laguna Merín; y en la zona de estudio se extingue bajo un campo de dunas al sur de la Ciudad de La Coronilla. Supone un área no anegadiza de casi 130 km², que otorga al paisaje una topografía suavemente ondulada, que se eleva hasta 25 m sobre el nivel del mar. Al oeste desaparece en el entorno de la cota 10 m, dando paso a los Bañados de Las Maravillas. Los materiales arenosos de la Barrera II constituyen buena parte del acuífero aquí considerado.

Los bañados de San Miguel y de las Maravillas que se desarrollan al oeste de la Barrera II están aso-

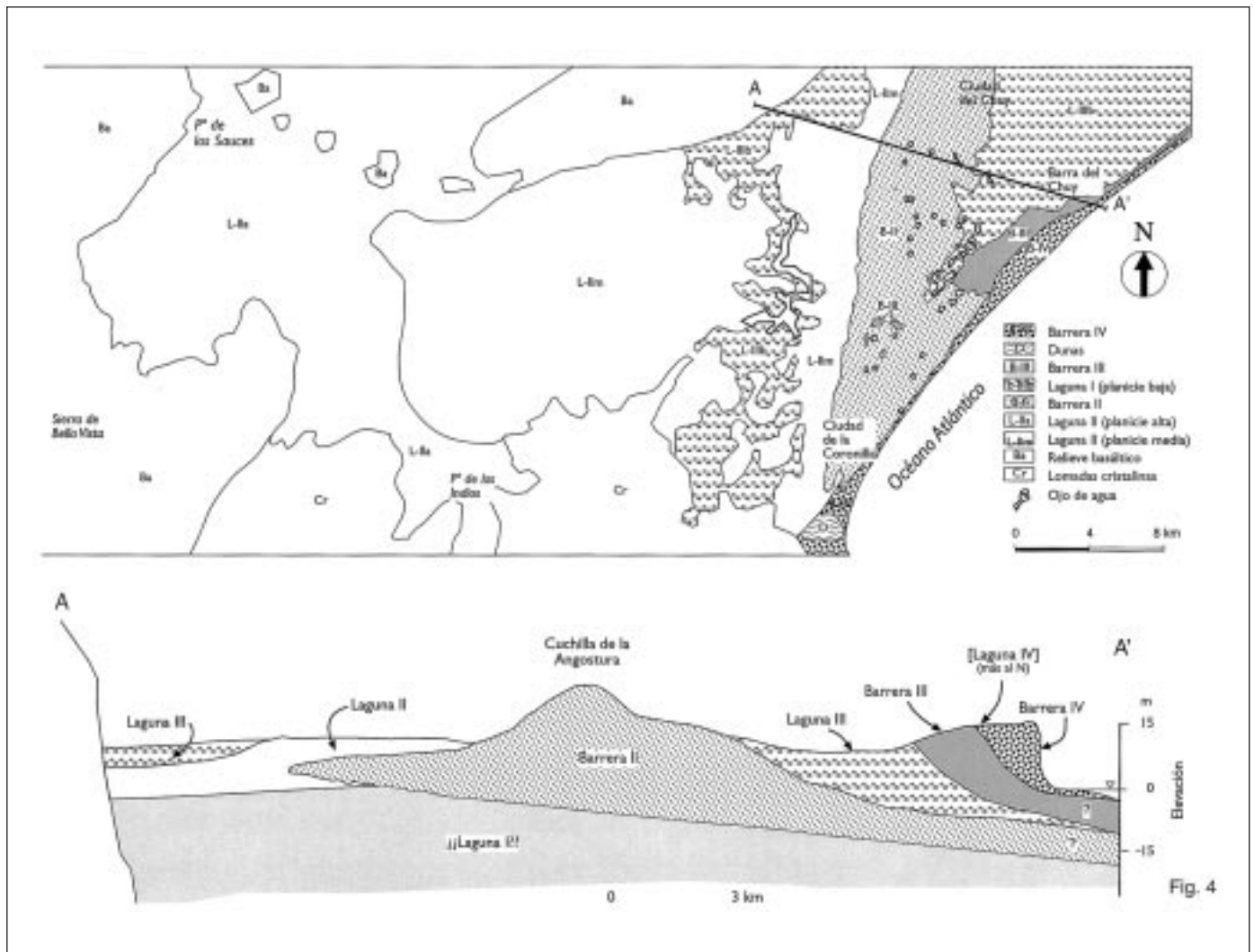


Fig. 4. Detalle geomorfológico del área de estudio, con una sección representativa que corta a la Cuchilla de la Angostura y llega a la zona costera

Fig. 4. Geomorphological detail of the study area with a representative cross-section through the Cuchilla de la Angostura, up to the coastal zone

ciados con el Sistema Laguna II. En ellos se distinguen las planicies altas (no inundables) y las planicies medias, donde se observa la presencia casi permanente de agua, que llega a superar los 0,5 m sobre la superficie del terreno, principalmente al centro y norte de la zona considerada. El Bañado San Miguel presenta una cota de unos 8 m en la franja central, mientras que en el Bañado de Las Maravillas la cota en el centro y hacia el noreste es de 5 m sobre el nivel medio del mar. Las planicies presentan un drenaje no definido y su pendiente varía entre 0,3 y 0,5‰, con inclinación hacia el noreste.

El origen de la lámina de agua actual está asociada al flujo subterráneo, a las precipitaciones, a las aportaciones de aguas superficiales que atraviesan los bordes y proceden de áreas exteriores a la de estudio, y al escurrimiento proveniente de las lomas rocosas. El suelo en esta unidad es un gley hidromorfo, con textura arcilloso-limosa. Los sedimentos de este sistema lagunar se asocian a la Formación Dolores (tabla 2).

El Sistema Laguna-Barrera III representa el tercer evento transgresivo-regresivo pleistocénico, con una edad del pico transgresivo de 120 ka por termoluminiscencia (Martín *et al.*, 1982). El sistema Laguna III corresponde a la implantación final de la Laguna Merín, que se extiende casi continuamente desde Ciudad del Chuy hasta la Ciudad de Torres, en Brasil, y en territorio uruguayo al Bañado de La Barrita, al este de la Cuchilla de la Angostura.

Las barreras II y III se asocian a la Formación Chuy. Los sedimentos del sistema Laguna III se pueden asociar a la Formación Villa Soriano, y ocupan el área del Bañado de la Barrita y el centro del Bañado de las Maravillas en las planicies bajas, en un entallamiento del Sistema Lagunar II, localizándose a cotas inferiores a 5 m.

El Sistema Laguna-Barrera IV es el más reciente. Se ha desarrollado durante el Holoceno como resultado de la última gran transgresión marina, de edad aproximada 5 ka, en la cual el nivel del mar estuvo 5 m por encima del nivel actual (Villwock y Tomazelli, 1995). Esto generó las condiciones de deposición de una barrera formada por arenas de playas y dunas eólicas, que en la zona del estudio alcanza 2 km de ancho y que se extiende en Brasil por toda la línea de costa de Río Grande do Sul. Estas dunas actúan como núcleos de acumulación de los sedimentos arrastrados desde la trasecosta (*backshore*). Se extienden a lo largo de la costa, alcanzando una altura de 15 m sobre la línea de playa, con suelos arenosos poco desarrollados y una vegetación herbácea muy pobre. Entre Ciudad de La Coronilla y Barra del Chuy se trata de un triple tren de dunas eólicas, con corrales inter-

dunales y recortes transversales por las vías de drenaje superficial, que en parte se alimentan de manantiales.

En territorio brasileño el Sistema Lagunar IV se emplaza entre las Barreras III y IV, conformando la laguna Mangueira y un rosario de lagunas distribuidas sobre la costa hacia el norte. En territorio uruguayo no afloran depósitos de esta Laguna IV.

La trasecosta tiene una configuración rectilínea y regular, característica de una playa disipativa (Villwock y Tomazelli, 1995) expuesta a la acción de olas de energía media y alta, con baja amplitud de marea y abundancia de arena fina.

Las lomadas cristalinas y basálticas representan el límite sur, oeste y norte de la región estudiada, excepto en el Paso de los Indios y en el Paso de Los Sauces. Alcanzan cotas que superan cotas de 150 m y tienen forma de cuchillas alargadas. Las colinas graníticas, ubicadas al sur y SE de la región, presentan un relieve suave y ondulado, mientras que las basálticas, distribuidas al SO, oeste y norte, presentan un relieve disimétrico, a veces con frentes escarpados.

Las formaciones acuíferas y sus características litológicas

El conocimiento de las formaciones acuíferas procede de la información derivada del seguimiento de la perforación de los pozos y de la realización de un conjunto de sondeos de reconocimiento y piezométricos, más una serie de campañas geofísicas, todo ello realizado para apoyar el trabajo de base (Almagro, 2001) en el que se fundamenta este artículo.

La principal formación acuífera aquí considerada son las arenas pleistocenas-holocenas de la Formación Chuy (Tabla 2), cuya potencia máxima en la región no supera los 60 m. Se extiende sobre una planicie costera que se desarrolla desde la Ciudad de la Coronilla hasta la Ciudad de Torres, en Brasil, sobre el estrato de arcilla presente entre los 27 y los 50 m de profundidad en Ciudad del Chuy, al que Eochard (1977) relaciona con un retroceso del mar y lo asocia a un régimen de aguas rasas en ambiente reductor (color gris a gris verdoso). Este estrato, que presenta una pendiente al SE, reviste particular importancia pues constituye el muro del acuífero principal y lo separa hidráulicamente de los posibles niveles permeables inferiores. En la Ciudad del Chuy alcanza la mayor profundidad en la región, con cotas de hasta -21 m, mientras que en el área de la Cuchilla de la Angostura queda entre -10 y -15 m (fig. 5).

El estrato de arena fina descrito entre los 7 y los 27 m del antiguo sondeo profundo de la Ciudad del

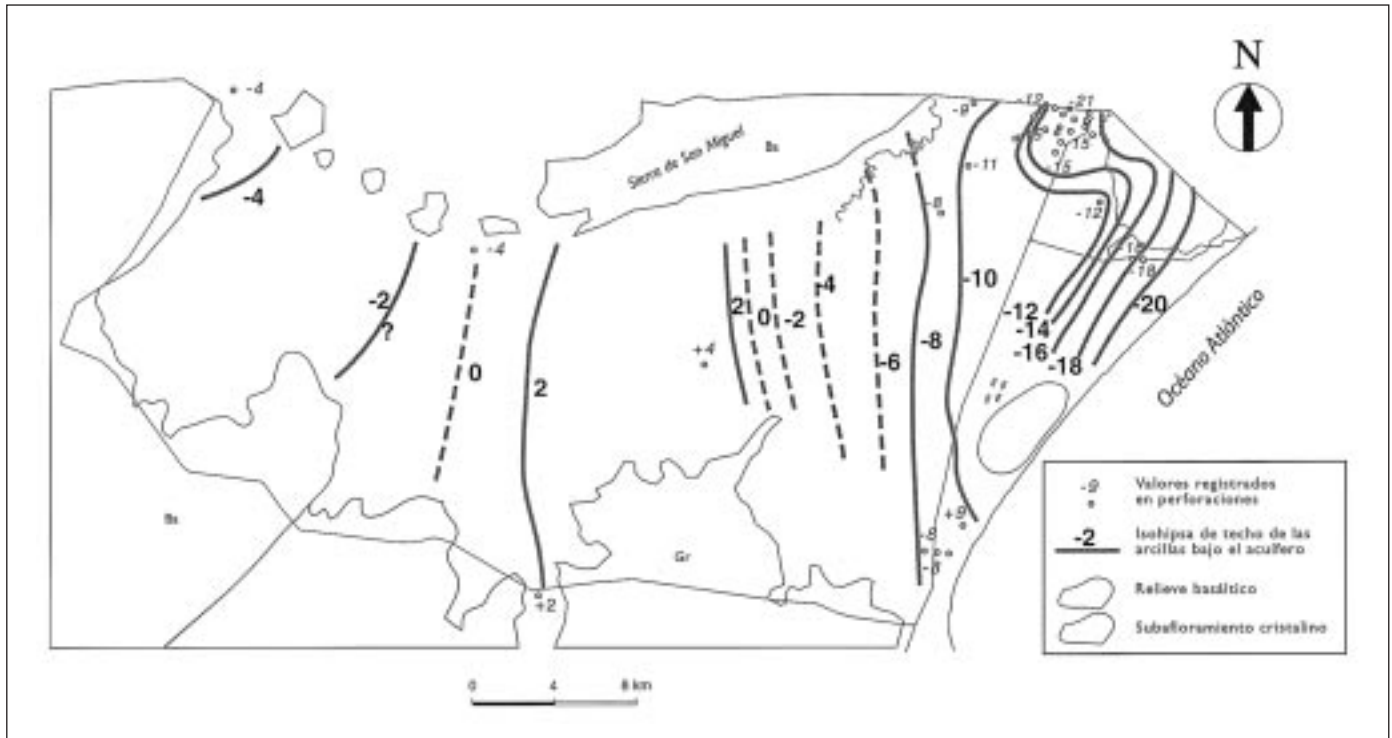


Fig. 5. Mapa tentativo de isoprofundidad del zócalo de las arenas del acuífero Chuy, considerando el subafloramiento de rocas cristalinas cerca del área costera

Fig. 5. Approximate map of equal depth to the bottom of the Chuy aquifer sands, taking into account the sub-outcropping of cristaline rocks near the coastal zone

Chuy constituye el acuífero principal, y corresponde a depósitos de acumulación marina en condiciones poco profundas y de playa, y a acción eólica, con una secuencia vertical que indica un proceso progradante (Tomazelli, 1985). En la figura 6 se da una sección ilustrativa. Su génesis se asocia al segundo y tercer evento transgresivo-regresivo del Pleistoceno, o sea a las barreras arenosas Barrera II y Barrera III, que constituyen la Cuchilla de la Angostura. Su presencia en la región corresponde al de una faja de dirección NE de aproximadamente 2 km de ancho y 10 km de largo, parcialmente recubierta por las dunas costeras.

En el área de estudio, la Barrera II constituye el cuerpo principal del acuífero. En el entorno de la Ciudad del Chuy alcanza su mayor potencia, mientras que en el centro del Bañado de San Miguel las arenas se extinguen entre las arcillas de las Lagunas II y III. En la mitad sur de la Cuchilla de la Angostura se interrumpe por la elevación y los afloramientos del zócalo cristalino. La falta de datos de perforaciones no permite determinar la extensión de dicha Barrera hacia el este, por debajo de las arcillas de la Laguna III, aunque aquí se sostiene la hipótesis de que se extiende hacia la costa, como se argumenta más adelante.

La Barrera III constituye el sector este del acuífero y de la Cuchilla de la Angostura. Su expresión en territorio uruguayo es muy inferior a la de la Barrera II, desarrollándose al este del estrato arcilloso de la Laguna III.

Las arenas acuíferas son finas, redondeadas y bien seleccionadas, de color blanco-grisáceo, bastante homogéneas, con tamaño medio de grano entre 0,1 y 0,2 mm, con apenas 1 a 2% de arena media; la fracción limo varía entre 4 y 12%, y la fracción arcilla en torno al 25% (Delaney, 1965). Predomina el cuarzo (60-85%) y secundariamente los feldespatos (20-35%). Un 20% en los granos de tamaño de 0,2 a 0,3 mm tienen la superficie opaca, y dicha proporción es superior al 40% en los granos de 0,125 a 0,250 mm, lo que apunta a la existencia de playas de carácter transgresivo, bordeadas por dunas eólicas. En el bañado y en sus inmediaciones, los granos de arena presentan mayor angulosidad y mayor contenido de feldespatos que en la Cuchilla de la Angostura, lo que indicaría una deposición menos agresiva, aislada de la acción marítima directa.

El estrato que sobreyace a las arenas de la formación Chuy se ha denominado Formación Coronilla (Eochard, 1970). Se trata de limos arenosos y arenas

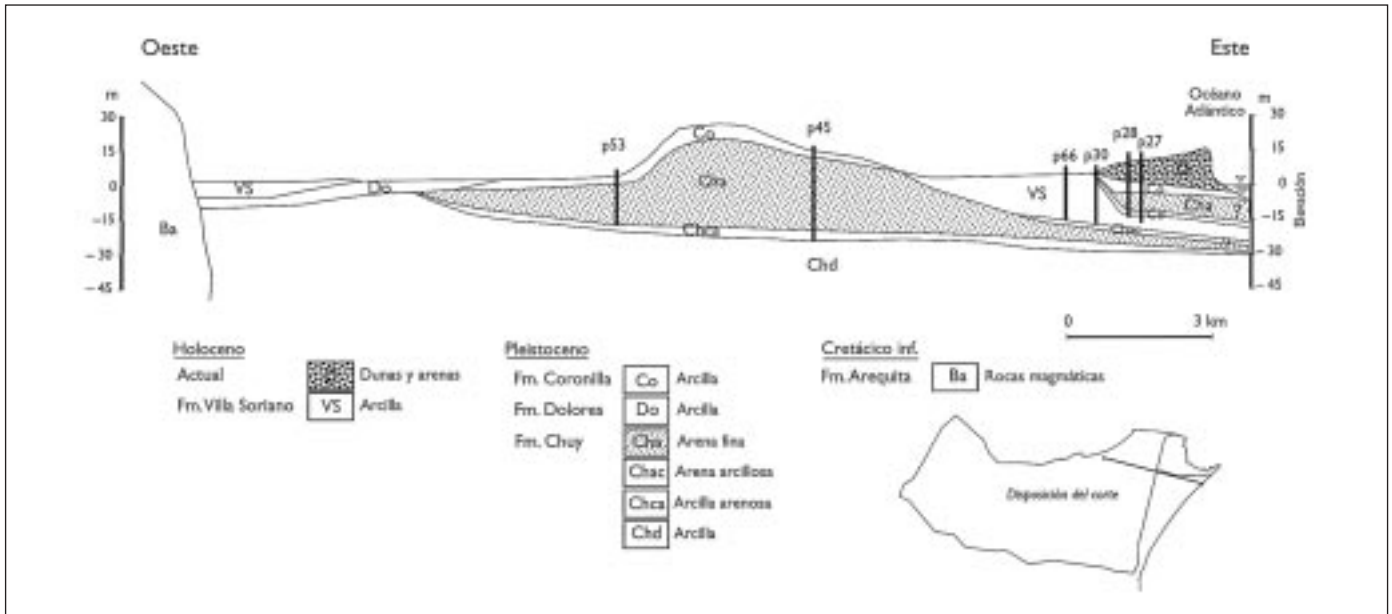


Fig. 6. Corte litológico de la Cuchilla de la Angostura y área costera con indicación de materiales y las formaciones a los que se atribuyen. Compárese con la sección geomorfológica de la fig. 4

Fig. 6. Lithological cross-section through the Cuchilla de la Angostura up to the coastal zone with the materials and the formations to which they are linked. To be compared with the geomorphological cross-section of fig. 4

limo-arcillosas, de origen eólico, de color marrón y gris verdoso, con presencia de nódulos de óxido de hierro y de carbonato cálcico, y de materia orgánica. La fracción arena es fina y de alta selección, con predominio de cuarzo, con similares características que la formación Chuy. Hacia la base aumenta la fracción arenosa hasta dominar. En el área considerada su potencia no supera los 10 m. Su área de afloramiento coincide con la Cuchilla de la Angostura. El porcentaje de arcillas, del tipo clorita e illita (Almagro, 2000), aumenta de este a oeste, lo cual es coherente con un origen eólico continental. Al sur de la Ciudad de la Coronilla y hacia la franja costera esta formación continúa por debajo de los campos de dunas. Este estrato afecta a la recarga por la lluvia y condiciona la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

La formación Dolores consiste en arcillas limo-arenosas, de color gris verdoso, con presencia de nódulos de carbonato cálcico y de materia orgánica. Se trata de arcillas de tipo vermiculita (Almagro 2001), similares a las de la formación Chuy. En la zona de estudio se emplaza al oeste de la Cuchilla de la Angostura, en las planicies medias y altas del área de bañados, y se asocia al sistema deposicional de la Laguna II.

La formación Villa Soriano se corresponde con los depósitos arcillosos depositados en las terrazas bajas (cotas inferiores a los 5 m) de los Bañados del Este y del Oeste (respecto a la Cuchilla de la Angostura), y

se vincula al sistema deposicional de la Laguna III. En la zona de estudio esta formación aflora a lo largo de la Cañada de la Barrita, que drena el Bañado de La Barrita, y del Arroyo de San Miguel y las áreas lagunares en su cabecera. Se trata de arcillas pardas, que pasan a gris hacia la base. Al igual que la Formación Dolores constituye un techo de baja permeabilidad para el acuífero principal. En Brasil la mayor parte del sistema de la Laguna III fue ocupada por los cuerpos asociados a la Laguna Merín.

Las dunas y depósitos costeros corresponden a arenas finas con escasa arena media. El porcentaje de finos apenas corresponde al 1% y es el típico polvo existente en las formaciones eólicas. Se distribuyen desde la Ciudad de la Coronilla hasta el balneario de Barra del Chuy. Se les asocia a la Barrera del sistema deposicional IV. La existencia de vientos del SE de fuerte energía condicionó la migración de las arenas en sentido noroeste, transgrediendo terrenos más antiguos (Tomazelli, 1990). Al Sur de la Ciudad de La Coronilla se presenta un campo de médanos dinámicos, cuya orientación coincide con la orientación de los vientos oceánicos del sureste y este.

Funcionamiento de las aguas subterráneas

El acuífero que se considera, y el único que actualmente se explota excepto para unos pocos pozos en

el entorno de Ciudad de La Coronilla, son las arenas de la formación Chuy. Se trata de un acuífero relativamente somero de características freáticas o semi-confinadas por los materiales arcillosos y arcilloso-arenosos más recientes de recubrimiento, que en una parte del territorio contienen la superficie freática, y a través de los cuales se realiza la recarga local. El acuífero se encuentra principalmente en la Cuchilla de la Angostura y se abre hacia Ciudad del Chuy. En el área de estudio limita al norte con el Arroyo Chuy, que es preferentemente efluente, su espesor se anula al sur (subafloramientos cristalinos) y al oeste (área de bañados), y al este toma contacto con el Océano Atlántico o puede quedar confinada bajo el mismo. El Bañado de La Barrita supone un área local de drenaje al Arroyo Chuy.

La recarga se produce casi exclusivamente por infiltración del agua de lluvia. La precipitación supera a la evapotranspiración potencial en cuanto a los valores anuales, y también la supera en una buena parte de los meses del año. El que en unos lugares el suelo sea arenoso y en otros arcilloso afecta al balance hídrico en el suelo, con lo que la recarga varía de un lugar a otro, aún con unas condiciones atmosféricas relativamente homogéneas. La capacidad de infiltración medida en suelos arcillosos es de casi 2 mm/día en la franja costera y Cuchilla de la Angostura y de 1,2 mm/día en gleys de la zona de bañados, lo que hace que se produzca escorrentía superficial con precipitaciones algo intensas. Las recargas resultantes del cálculo con ayuda del programa BALAN (Samper y García Vera, 1997), varían entre 10 mm/a para las áreas de bañados no encharcados y 110 mm/a en la zona de dunas y arenales de la franja costera.

Se dispone de datos no regulares de piezometría desde el año 1981 y regulares regionalizados entre 1994 y 1998 en pozos y también en piezómetros especialmente construidos, obtenidos para el estudio (Almagro, 2001) que soporta este artículo. Las variaciones temporales del nivel piezométrico son moderadas, de menos de 0,5 m, salvo por efecto de bombeos próximos. La figura 7 es una superficie piezométrica representativa que cubre sólo parte del territorio ya que la distribución de puntos de observación es irregular. Se presenta una elevación alargada a modo de domo sobre la Cuchilla de la Angostura, con flujo de descarga hacia los bañados y el Arroyo Chuy, sin que quede claro como es el flujo hacia el mar, aunque todo apunta a que hay descarga hacia el mismo. En la franja costera las Barreras III y IV muestran una piezometría local elevada que se representa por separado, la cual puede ser la responsable de los manantiales existentes a lo largo de la costa.

La profundidad del nivel freático bajo la superficie del terreno llega a 12 m en la dorsal de la Cuchilla de la Angostura, pero en amplias zonas es inferior a 2 m, y aún a 1 m, lo que explica la aparición local de ojos y pequeños humedales en ese área.

La explotación del acuífero es aún moderada por lo que su efecto sobre la piezometría es pequeña, excepto en el área urbana de Ciudad del Chuy, donde se extrae alrededor de 1 hm³/año, mientras que en Ciudad de La Coronilla y Barra del Chuy se estima que se bombean 0,08 y 0,03 hm³/año respectivamente (Almagro *et al.*, 1988a; Almagro, 2001).

Una serie de muestreos y ensayos de bombeo durante la construcción de parte de los pozos y sondeos de reconocimiento ha permitido no sólo un buen conocimiento hidrogeológico sino también hidrodinámico de diversas áreas del acuífero (Almagro, 2001). Esto permite obtener un conjunto de parámetros hidráulicos confiables. Con ello se ha podido plantear una modelación numérica en régimen estacionario (Almagro *et al.*, 1998b) basada en ese conjunto y calibrarlo en función de la recarga. Los materiales acuíferos tienen una permeabilidad entre

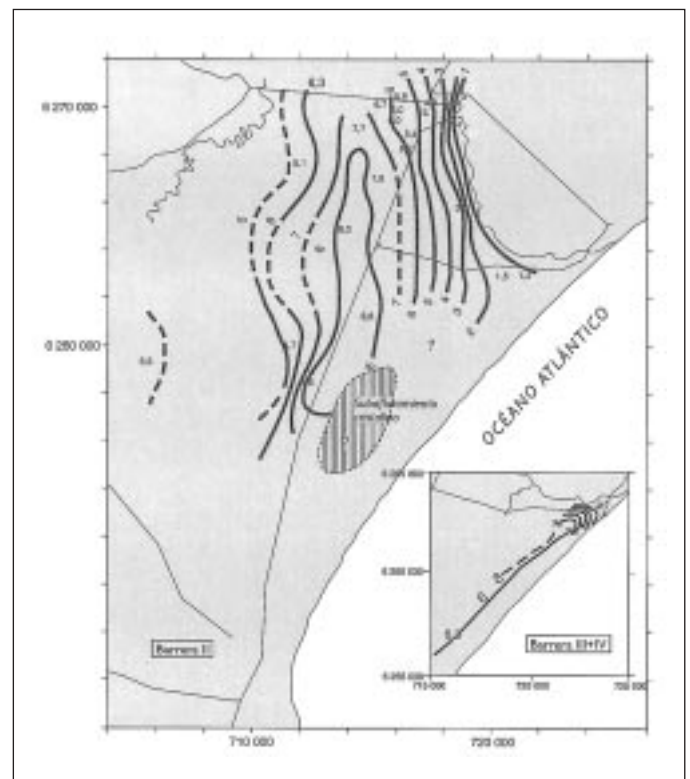


Fig. 7. Mapa piezométrico del acuífero Chuy en La Cuchilla de la Angostura y detalle de la piezometría en el área costera de barra del Chuy

Fig. 7. Piezometric map of the Chuy aquifer in Cuchilla de la Angostura and detail of piezometry in Barra del Chuy coastal area

0,8 y 8,5 m/día, según las zonas, y se ajustan valores medios zonales de la recarga de unos 100 mm/año para la Cuchilla de la Angostura (suelo limo-arenoso) y de hasta unos 260 mm/año para la franja costera (suelo areno-limoso), y despreciables en los bañados (Almagro, 2001). La recarga total media se evalúa entre 5 y 14 hm³/a, según sean las hipótesis de modelación. El modelo requiere una descarga del acuífero Chuy a lo largo de la costa.

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas

Como ya se ha expuesto, el sistema acuífero cuaternario de la región del Chuy consiste básicamente en arenas silíceas, con un 15-20% de feldespatos alcalinos, principalmente albita. Estos materiales poco meteorizables condicionan una baja mineralización del agua subterránea en este clima subhúmedo. La pequeña profundidad del nivel freático en muchas áreas permite procesos locales de concentración del agua por evapotranspiración freática, además de la que producen los procesos edáficos.

Las muestras de agua obtenidas en torno a la Cuchilla de la Angostura se han considerado como características del agua del sistema acuífero. Las características del subsuelo en la zona de estudio condicionan que la química del agua subterránea corresponda a un número reducido de fases reactivas. En la explicación de la composición del agua de la región se han considerado los aportes atmosféricos, la evaporación y evapotranspiración, las reacciones con el medio silicatado y carbonatado, los posibles procesos de intercambio iónico en determinadas circunstancias, y la mezcla de aguas.

La lluvia local representa la única fuente significativa de recarga al sistema acuífero. No se ha dispuesto de análisis químicos de la misma. Por tratarse de una zona próxima a la costa y poco antropizada es de esperar que la composición de la lluvia sea similar al agua del océano diluida (Custodio y Llamas, 1983). Comparando con las aportaciones atmosféricas de cloruros en la Península Ibérica (Alcalá y Custodio, 2004) y en otros lugares en áreas costeras de relieve suave y clima algo lluvioso, cabe esperar valores para el aporte atmosférico de cloruro de 3 a 5 g·m⁻²·año⁻¹, pero con gran imprecisión dada la gran variabilidad que se produce en la franja costera, con un marcado gradiente decreciente desde el litoral hacia el interior.

El arroyo Chuy es normalmente efluente (salvo por el efecto de bombeos próximos), y la posible intrusión marina es en todo caso muy limitada, aun que puede existir una cierta influencia mareal.

Los valores químicos característicos de las aguas subterráneas de la Cuchilla de la Angostura (sin considerar las más salinas del entorno del Bañado de La Barrita) se dan en la tabla 3 y se representan en la figura 8, prescindiendo de las situaciones más extremas.

Se trata de aguas de carácter clorurado sódico, con contenidos apreciables de bicarbonato y calcio, de modo que en ocasiones llegan a ser bicarbonatadas sódicas, en especial en el entorno de Barra del Chuy. Las relaciones Cl/SO₄ y Na/Mg suelen ser próximas a los valores marinos. En general existe un cierto exceso de Na respecto al Cl, lo que indica meteorización de minerales silicatados sódicos, tipo albita, lo que se refleja en el relativamente alto contenido de sílice disuelta, del orden de 45 mg/L expresados como SiO₂.

Hay un aporte de Ca litológico, procedente en buena parte de restos de carbonato cálcico organógeno que puede aún quedar en los sedimentos. Va acompañado de la formación bicarbonato a partir del CO₂ disuelto y de la roca.

Ión	Cuchilla de la Angostura (Barrera II)		
	Área Norte	Área Centro y Sur	
Ca	1,5 (0,9-2,0)	1,7 (0,7-2,9)	
Mg	0,8 (0,4-1,0)	0,6 (0,3-1,0)	
Na	3,8 (2,6-5,1)	3,0 (1,3-4,5)	
K	0,1 (~0,1)	0,1 (~0,1)	
HCO ₃	2,0 (1,8-3,1)	2,6 (1,6-3,7)	
Cl	3,4 (2,1-5,2)	2,8 (0,3-3,4)	
SO ₄	0,2 (0,1-0,4)	0,3 (0,2-0,5)	
NO ₃	0,3 (<0,1-0,8)	<0,1 (<0,1-0,5)	
	Barra del Chuy		
	Bañado de la Barrita (Barrera II)	Área costera (Barrera III)	Cerca Ayo. Chuy (Barrera III)
Ca	2,3 (1,6-2,7)	1,0 (0,6-2,2)	3,5 (3,4-3,6)
Mg	1,0 (~1,0)	1,2 (0,8-1,3)	1,8 (~1,8)
Na	7,4 (5,7-8,3)	1,4 (1,0-6,1)	24,0 (21,0-26,0)
K	0,3 (~0,3)	0,1 (0,0-0,3)	0,5 (~0,5)
HCO ₃	5,4 (4,4-5,6)	2,2 (1,0-5,2)	5,6 (5,5-5,7)
Cl	4,2 (3,8-5,4)	1,6 (1,0-4,3)	22,0 (20,0-23,0)
SO ₄	0,1 (0,1-0,2)	0,1 (~0,1)	0,7 (0,7-0,8)
NO ₃	0,0 (0,0-0,3)	0,0 (~0,0)	0,2 (~0,2)

Tabla 3. Valores iónicos característicos de las aguas subterráneas de las arenas de la Cuchilla de la Angostura y Barra del Chuy. Concentraciones en meq L⁻¹. Se indica la mediana, y los valores máximo y mínimo entre paréntesis.

Table 3. Characteristic groundwater ionic values from the Cuchilla de la Angostura and Barra del Chuy sands. Concentrations in meq L⁻¹. The median, and the maximum and minimum values between parenthesis, are given

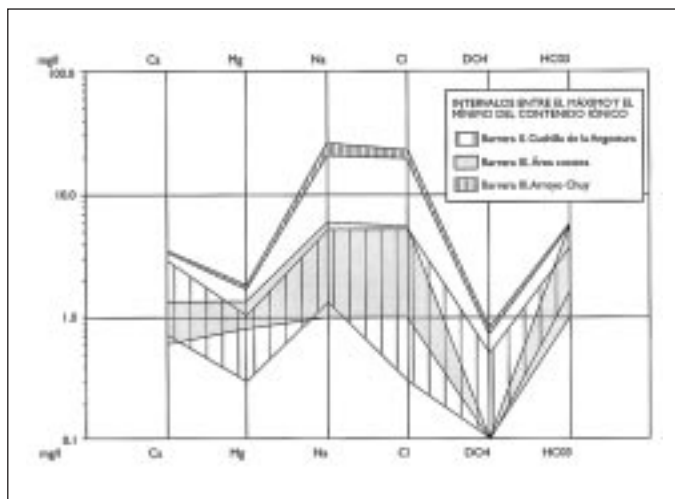


Fig. 8. Campos de variación de la composición química de las aguas del acuífero Chuy en un diagrama de columnas verticales logarítmicas

Fig. 8. Bands containing the chemical composition of the Chuy aquifer waters in a vertical logarithmic column diagram

El contenido en ión nitrato es moderado pero puede llegar a ser notable en algunos puntos, en especial en el entorno de Ciudad del Chuy. Es explicable por contaminación antrópica urbana y ganadera.

De acuerdo con el contenido en cloruro en el agua subterránea y la incierta aportación atmosférica esperable, se puede evaluar una recarga media multi-anual, sobre todo el territorio, entre 25 y 40 mm/año, con áreas locales de gran recarga (suelos arenosos poco vegetados) en que pudiera llegar a más de 300 mm/año (todo ello suponiendo una escorrentía superficial relativamente pequeña). Estos resultados, que pueden tener gran error y son sólo orientativos, están en el rango esperable de la modelación numérica.

La distribución de las composiciones químicas se muestran en la figura 9 mediante diagramas Stiff modificados. Destaca que en el entorno del Bañado de la Barrita las aguas están más mineralizadas en todos los componentes, y sobre todo cerca del Arroyo Chuy. Se trata de arenas de la Barrera II. La posible explicación se dará más adelante. Fuera de estos puntos y de los pozos cerca de la Ciudad de La Coronilla, que explotan un acuífero más profundo, se trata de aguas poco mineralizadas, con variaciones espaciales que en parte reflejan los cambios en la recarga.

Los valores de pH registrados en campo indican un carácter ácido en el agua de ambas barreras, con valores que oscilan entre 6,1 y 6,6, con baja variabilidad espacial. El agua del Arroyo Chuy presenta valo-

res de pH más altos, en torno a 7,8, y también las perforaciones de la Barrera III cercanas a dicho curso superficial. Estos valores de pH más altos son coherentes con la presencia en dicha zona de sedimentos fosilíferos ricos en carbonatos, y a la posible desgaseificación por pérdida de CO₂ de la descarga de agua subterránea.

La alcalinidad del agua del acuífero está controlada por la presencia de los niveles fosilíferos de conchillas existentes en los estratos con menor permeabilidad que recubren al acuífero en las zonas de Bañados del Este y del Oeste. La determinación de la alcalinidad se ha realizado exclusivamente en laboratorio, por lo que su valor puede estar afectado por la oxidación de iones metálicos y sobre todo por el escape de CO₂ y la precipitación de carbonatos. En torno a la Ciudad del Chuy es donde se presentan las menores alcalinidades, con valores inferiores a 1,7 meq/L. En la región de la Barra del Chuy la alcalinidad del agua subterránea es indicativa de la situación de las rejillas de las perforaciones frente a los niveles limo-arcillosos con alto contenido de conchillas, al igual que en los Bañados del Oeste, donde se superan los 3,3 meq/L.

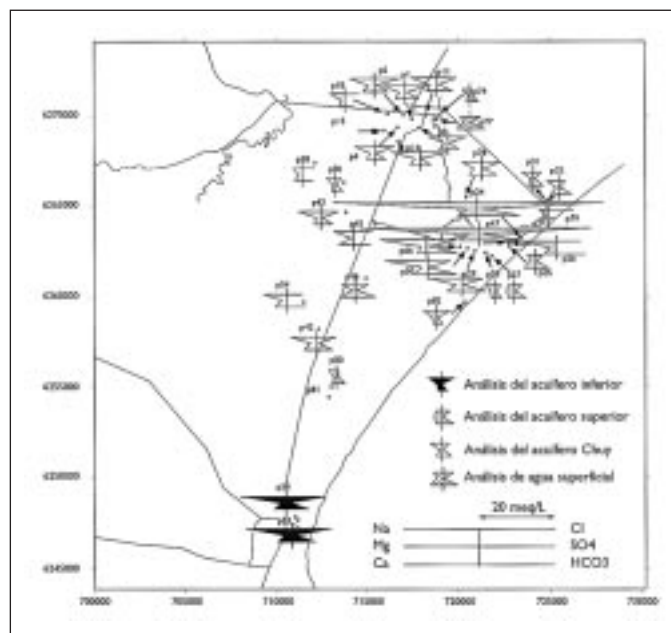


Fig. 9. Características químicas de las aguas del acuífero Chuy y otras aguas del áreas representados mediante diagramas modificados de Stiff. El acuífero inferior es la formación Raigón (tabla 1) y el superior agrupa las arenas de las barreras III y IV

Fig. 9. Chemical characteristics of the Chuy aquifer water and other samples from the area, shown by means of modified Stiff diagrams. The lower aquifer (acuífero inferior) is the formation Raigón (table 1), and the upper one (acuífero superior) correspond to the sands of Barriers III and IV

Mediante el código PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) se ha determinado la presión parcial de CO₂ de equilibrio en función de la alcalinidad medida en laboratorio y de los pH de campo y de laboratorio. En la tabla 3 se presentan algunos valores de pCO₂, determinados con ambos valores del pH, observándose que las diferencias pueden llegar a 0,4. Debido a que el pH de laboratorio es el dato más abundante, es el valor que se ha usado para calcular la PCO₂ de equilibrio del agua subterránea de la región. Estas presiones parciales de CO₂ de equilibrio, entre 10^{-0,88} y 10^{-2,88} atm, son de elevadas a moderadas con respecto a la atmósfera (10^{-3,88}). Esta mayor presión se debe a la respiración de los vegetales y a la descomposición de la materia orgánica en el suelo edáfico. Las mayores PCO₂ corresponderían a las perforaciones localizadas en la Cuchilla de la Angostura en el centro de la Ciudad de Chuy, coincidiendo con una mayor profundidad de la superficie piezométrica (Fig. 10), y con las mayores concentraciones de nitratos que se asocian a contaminación antrópica.

Las muestras de agua de las perforaciones de la Barrera III presentan presiones parciales de CO₂ más moderadas, como corresponde a suelos más arenosos y con menor cobertura vegetal. En las muestras que corresponden a cursos de agua superficiales (p71 y p79) se observan presiones parciales de CO₂ un orden de magnitud mayor que la atmosférica, lo cual se relaciona con el origen de esta agua como drenaje de la zona de bañados.

Análisis multivariado de los datos hidroquímicos del acuífero

Con el análisis multivariado se trata de relacionar cuantitativamente un mayor número de parámetros fisicoquímicos que lo que se obtiene mediante los análisis uni y divariado clásico.

Para realizar el análisis de agrupaciones (*cluster*) de casos se ha considerado conjuntamente el total de muestras de agua de toda la región, con el objetivo de vincularlas hidroquímicamente, descartando las muestras de agua con errores analíticos en el balance iónico superiores a un 7% de la semisuma de aniones y cationes. Se trata de una población de 36 muestras, en la cual se han considerado como variables a las especies principales Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, pH de laboratorio, índice de saturación con respecto a la calcita (calculado) y profundidad del nivel del agua. Como medida de la separación entre individuos se ha tomado la distancia euclídea, la cual se define como la raíz cuadrada de la suma de los p cuadrados de las diferencias entre los valores observados en las p

variables para los dos individuos correspondientes. La distancia es nula cuando los dos individuos presenten exactamente los mismos valores en las p variables y positiva cuando difieran al menos en un valor. Se han realizado distintos ensayos, que no se presentan aquí. Variando el número de variables consideradas no hay diferencias esenciales en los den-

Sondeo	a=log PCO ₂ con pH campo	b=log PCO ₂ con pH laboratorio	a-b	Área
p10	-0,89	-1,00	0,11	C. Chuy
p11	-1,29	-1,31	0,02	C. Chuy
p17	-1,43	-1,60	0,17	C. Chuy
p27	-2,12	-2,20	0,08	B. Chuy
p33	-1,73	-1,83	0,10	C. Coronilla
p4	-0,91	-1,35	0,44	C. Chuy
p5	-0,87	-0,98	0,11	C. Chuy
p77	-2,25	-2,56	0,31	A. Chuy
p81	-1,57	-1,98	0,41	Cuchilla A.
p9	-1,36	-1,61	0,25	C. Chuy

Tabla 4. Presiones parciales de CO₂(g) de muestras de agua de pozos y sondeos determinadas en función de la alcalinidad de laboratorio y de los pH de campo y de laboratorio
 Table 4. CO₂(g) partial pressures from well and borehole water samples, determined after the laboratory and the field alkalinity, and the laboratory pH values

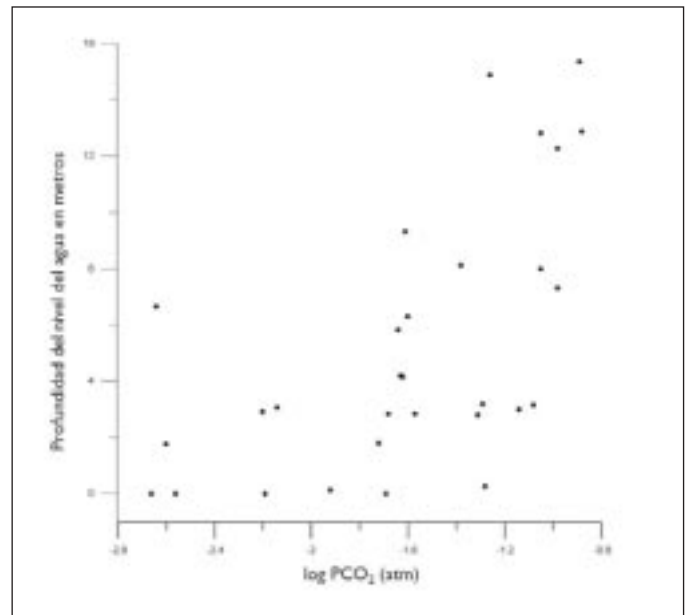


Fig. 10. Relación entre la profundidad del nivel del agua subterránea en los pozos y la presión parcial de CO₂ calculada a partir del análisis químico
 Fig. 10. Plot showing the relationship between the groundwater level depth in the wells and the CO₂ partial pressure calculated from the chemical analysis

drogramas obtenidos. Se observan cuatro agrupaciones principales, que coinciden con el centro de la Cuchilla de la Angostura (Barrera II), con sus áreas marginales, con la franja costera (Barreras III y IV) y con el área sur correspondiente al acuífero Raigón. Las muestras correspondientes a los sondeos del área del entorno de los bañados muestran grandes distancias con el resto de los grupos.

Mediante el análisis de agrupaciones de variables se busca determinar grupos homogéneos de esas variables dentro de una misma familia, o sea la similitud (proximidad) entre las variables. Se ha seleccionado la determinada en la agrupación de casos correspondientes a 9 muestras de la zona central de la Cuchilla de la Angostura y a 5 individuos pertenecientes a la Barrera III (zona costera). Las variables seleccionadas para este análisis han sido el pH de laboratorio, Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, PCO_2 (calculado), el índice de saturación con respecto a la calcita (calculado) y la profundidad del nivel del agua. Mediante el método de Kolmogorov-Smirnov se ha comprobado que las variables implicadas se ajustan razonablemente a una distribución normal.

Como criterio de similitud se ha tomado el coeficiente de correlación de Pearson, que tiene en cuenta el grado de asociación lineal entre cada par de variables. Dos elementos del análisis están próximos cuando el valor de la medida de similitud es próximo a ± 1 y alejados cuando tiende a cero.

En el dendrograma que resulta para las muestras de la Cuchilla de la Angostura (no se incluye) se observa una elevada correlación entre Ca, K, IS- CaCO_3 (índice de saturación en calcita) y HCO_3 , y correlaciones más débiles entre Na y Cl, y entre PCO_2 y profundidad. La matriz de distancias (tampoco se incluye) muestra una relación inversa entre IS- CaCO_3 y la PCO_2 , la profundidad del techo del acuífero y el SO_4 , así como una baja relación entre Mg, SO_4 , PCO_2 y profundidad del techo del acuífero con las demás variables.

Para la familia constituida por cinco individuos de aguas dulces de la Barrera III en la zona costera ya no se presenta una elevada relación entre el Na y el Cl, debido a la adición de Na a causa de los procesos de alteración de silicatos. Esto se traduce en una alta relación entre las variables Ca, HCO_3 , K y SO_4 . Destaca la relación inversa del Na con todas las variables salvo con el pH y la PCO_2 .

Interpretación hidrogeoquímica

Los procesos que justifican la evolución química de las aguas deben ser coherentes con los minerales

presentes en las litologías de las diversas capas que componen el sistema acuífero que son, como ya se ha comentado anteriormente:

- arcillas de base: domina la vermiculita y montmorillonita depositadas en ambiente reductor de aguas rasas; presencia de carbonatos de conchas de bivalvos marinos
- arenas de los estratos permeables: fundamentalmente granos de cuarzo; el resto son feldespatos alcalinos frescos (microclina y albita, ~20%), plagioclasas alteradas (5%), líticos y opacos
- limos arenosos y arenas arcillosas del techo del acuífero: limos eólicos con presencia de óxido de hierro, carbonato de calcio y materia orgánica, con la fracción fina de origen marino dominada por montmorillonita e illita; fracción arena con las mismas características que la que se encuentra en el acuífero.

Procesos químicos en las aguas subterráneas

Se ha analizado el comportamiento del agua de la región en relación con las fases minerales presentes en el sistema acuífero. Las fases consideradas se han seleccionado en base a las difractometrías de rayos X realizadas a las arcillas del muro y techo del acuífero, y al modelo sedimentario propuesto. Para ello se ha calculado mediante el código PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) el estado de saturación y la especiación de cada muestra del agua con análisis con bajo error en el balance iónico. En función del contenido de sílice y de las relaciones $\langle \text{Na}^+ \rangle / \langle \text{H}^+ \rangle$ y $\langle \text{K}^+ \rangle / \langle \text{H}^+ \rangle$ ($\langle \rangle$ indica actividad) se dibujan los diagramas de estabilidad para la clorita y los feldespatos sódico, cálcico y potásico.

Se ha considerado que una solución está en equilibrio con las diversas fases minerales cuando los índices de saturación están comprendidos entre -0,5 y +0,5 para así tener en cuenta las incertidumbres analíticas y en las constantes termodinámicas. Se han obtenido los estados de saturación con respecto a las especies minerales carbonatadas (calcita, dolomita y aragonito), yeso y sílice (cuarzo, calcedonia y sílice amorfa) a partir de 36 análisis químicos (ver Tabla 4). Los índices de saturación se han calculado con los pH determinados en campo y en el laboratorio, obteniéndose diferencias poco significativas en los resultados. En general las aguas subterráneas muestreadas están claramente subsaturadas respecto a la calcita, aragonito y dolomita. Se alcanza la saturación en unas pocas muestras en el entorno del Bañado de La Barrita, que son las más salinas, y unas pocas aguas dulces del área de Barra del Chuy, que explo-

Especie	log PCO ₂	Calcita	Aragonito	Dolomita	Yeso	Calcedonia	Cuarzo	Sílice (a)
n° datos	36	36	36	36	26	5	5	5
mayor	-0,88	0,52	0,37	0,85	-2,20	0,55	0,99	-0,34
1 ^{er} cuartil	-1,14	-0,46	-0,57	-1,07	-2,50	0,51	0,96	-0,31
Mediana	-1,62	-1,42	-1,35	-2,44	-2,90	0,45	0,89	-0,41
2° cuartil	-2,14	-1,76	-1,91	-3,77	-3,17	0,39	0,84	-0,47
menor	-2,85	2,43	-2,57	-4,76	-4,26	0,37	0,81	-0,48

Tabla 5. Índices de saturación calculados con el pH de laboratorio
 Table 5. Saturation indices calculated with the laboratory pH value

tan niveles ricos en restos fosilíferos carbonatados. El alto grado de subsaturación de muchas de las aguas muestreadas implica la ausencia de calcita (puede haber existido y se ha lixiviado) y la débil alteración de los silicatos cálcicos y magnésicos, en especial hacia el centro de la Cuchilla de la Angostura.

El agua del acuífero está levemente saturada respecto al cuarzo y la calcedonia, y levemente subsaturada respecto a la sílice amorfa, con tendencia general al equilibrio.

En la fig. 11 se presentan los diagramas de equilibrio a 25°C entre el agua y las fases minerales feldespatos cálcico, sódico y potásico, y la clorita (Tardy, 1971), donde se añaden las líneas de solubilidad para el cuarzo y la sílice amorfa a 20°C. Se supone que todo el aluminio presente pasa a formar parte de los productos de meteorización, lo que es razonable ya que el pH es mayor a 4,5. Se han representado los puntos que corresponden a las cinco muestras con determinación de sílice disuelta, que están situados a lo largo de la Cuchilla de la Angostura, cerca de la ruta 9. Se observa que las muestras se sitúan entre los campos de estabilidad del cuarzo y la sílice amorfa. En todos los casos se interpreta que el medio presenta un bajo grado de alteración y de lavado del suelo, lo que hace que el agua esté en equilibrio con la fase mineral montmorillonita (recarga moderada), y no lejos de la caolinita para las áreas de suelo más arenoso (mayor recarga).

Existe una correlación directa entre las concentraciones de sílice y de bicarbonato en las muestras, asociada al consumo de acidez en la meteorización de silicatos y a que el ácido carbónico es la principal fuente de protones. En la meteorización se produce un aporte de cationes, sílice y alcalinidad por aumento de bicarbonato, resultando un residuo secundario insoluble. Donde la presencia de materiales carbonatados es baja (Cuchilla de la Angostura), la composición del agua subterránea está gobernada por la química del agua de lluvia y por la evapoconcentración, con aportes moderados del medio sedimentario de

sílice, Ca, K y Na, que no modifican el tipo climático de aguas cloruradas sódicas. Al Este de la Cuchilla de la Angostura, en la Barrera III la presencia de restos de carbonatos fósiles permite la disolución de CaCO₃, lo que modifica el agua del acuífero a bicarbonatada cálcica. Esto lleva a diferencias entre el agua de los acuíferos de las barreras II y III. También se observan diferencias entre las aguas bicarbonatadas cálcicas típicas del acuífero de la Barrera III y el agua clorurada sódica extraída de las perforaciones en el entorno del Bañado de la Barrita.

Para su mejor caracterización se ha procedido a la modelación inversa en dos situaciones características.

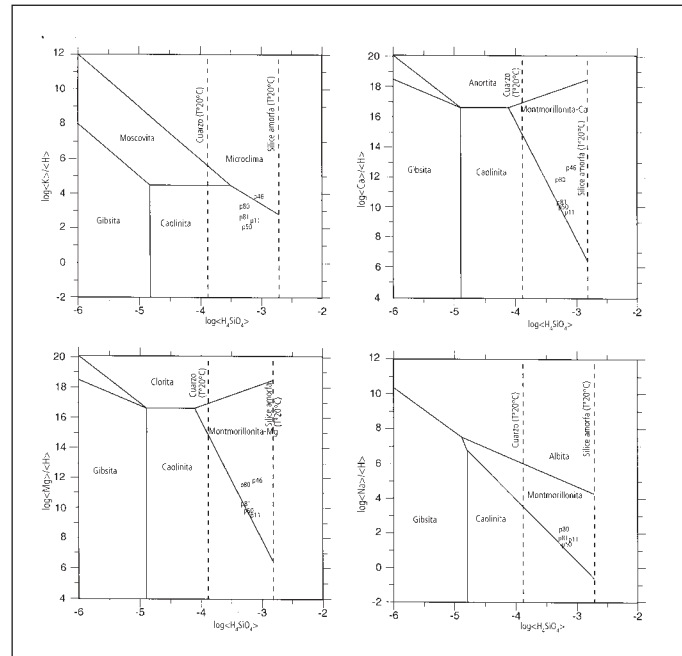


Fig. 11. Diagramas de Tardy de estabilidad de los silicatos de baja temperatura. Se indican los puntos que representan las aguas para las que se dispone de análisis de sílice disuelta
 Fig. 11. Tardy diagrams for silicate stability at low temperature. The points representing waters with dissolved silica analysis are plotted

En la simulación 1 se comparan aguas dulces, una clorurada sódica de la Barrera II en la Cuchilla de la Angostura y otra bicarbonatada cálcica y menos mineralizada de la Barrera III al Este del Bañado de la Barrita.

El agua de lluvia es la única fuente de recarga al sistema acuífero, modificándose su composición en el transcurso de su desplazamiento por el subsuelo. El suelo de la Cuchilla de la Angostura condiciona una mayor evapotranspiración al tener mayor capacidad de campo por contener más fracción fina, lo que supone una recarga con mayor concentración del agua de lluvia. Por otro lado los suelos más arenosos de la Barrera III, que tienen menor capacidad de campo, producen mayor recarga, que es más diluida. La presencia de restos fósiles carbonatados en el terreno modifica su composición.

Como agua característica del acuífero de la Barrera II se ha considerado el análisis químico del agua del sondeo p4 y como agua característica del acuífero de la Barrera III se ha seleccionado la composición química del sondeo p25 (fig. 9). Ambas aguas presentan un pH ácido y están subsaturadas respecto a calcita, aragonito y dolomita, en equilibrio con una presión parcial de CO₂ de equilibrio de 4,5x10⁻² atm. Se supone la misma composición en el agua de lluvia para ambas áreas, sin tener en cuenta la diferencia en el aporte de aerosol marino por distinta distancia a la línea de costa. El agua p4 es la más próxima a una simple concentración evaporativa ya que no se manifiestan importantes reacciones con el medio geológico, y la incorporación de CO₂ del suelo se hace sin producción significativa de HCO₃. Las relaciones iónicas son razonablemente próximas a las del agua marina, pero con un aumento de SO₄ y K, como sucede habitualmente en la lluvia. Su dilución hasta Cl = 0,15 meq/L (contenido hipotético medio del agua de lluvia) permite estimar el contenido orientativo de la composición del agua de lluvia. Este agua de lluvia sería la que con menor evapoconcentración y reac-

ción con el medio originaria el agua del p25. Para la simulación con el método inverso (dados los extremos, identificar las reacciones que se han producido para un cierto conjunto mineral) del programa PHREEQC se puede hacer la suposición que la concentración del agua p25, precipitando sales (reacción contraria a lo que se ha producido con el terreno) lleva al agua p4 (Almagro, 2001). Los resultados son que respecto a la posible lluvia en el sondeo p4 se ha producido una incorporación al agua subterránea de 4,1 mmol/L de calcita magnesiana, sin disolución significativa de silicatos. Cabe que el agua p4 haya sufrido una pequeña reducción de sulfatos o esté afectada por un cierto error analítico en la determinación de ese anión (hay 0,13 meq/L y cabe esperar más de 0,3 meq/L).

La simulación 2 tiene por objetivo reproducir numéricamente los procesos causantes de las diferencias entre el agua bicarbonatada cálcica característica de la Barrera III, y el agua clorurada sódica de elevada salinidad presente en las perforaciones p47 y p24, cercanas de Arroyo Chuy, en la Barra del Chuy. No es posible pasar de un agua a otra por simple concentración por evaporación. Aquí se considera que las aguas de esas últimas perforaciones están influenciadas por los restos de fósiles carbonatados presentes en dicha zona y por el aporte de aguas marinas residuales en los sedimentos recientes o por penetración desde la parte mareal del Arroyo Chuy.

Para representar el agua dulce típica del acuífero de la Barrera III se ha seleccionado un análisis de la perforación p25 y como agua salina se ha elegido la del sondeo p47. Las propiedades fisicoquímicas de ambas aguas se presentan en la tabla 6.

Se ha determinado el porcentaje de mezcla de agua de mar y del sondeo p25 que justificaría el contenido del ión cloruro (conservativo) en el sondeo p47. La solución resultante se ha puesto en presencia de calcita hasta alcanzar el índice de saturación 0,12 que presenta el agua p47, simultáneamente con fenó-

	Valores en moles/kg							pH Lab	IS calcita	logPCO ₂
	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄			
p25	0,925	0,453	1,13	0,074	2,51	1,30	0,190	6,3	-1,42	-1,14
p47	1,780	0,905	21,300	0,497	7,480	20,300	0,338	7,3	0,12	-1,72
mar local	10,0	45,3	365,0	12,8	1,92	441,0	20,5	7,5	-0,02	-2,68
resultado	1,670	0,955	23,400	0,436	7,17	20,400	1,070	7,37	0,12	-1,84

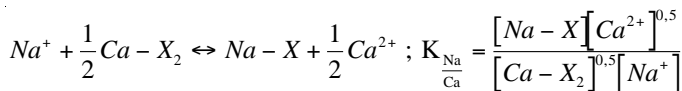
Tabla 6. Resultados de la evolución hidrogeoquímica entre los sondeos p25 y p47 de Barra del Chuy según el programa PHREEQC. Ambas aguas están subsaturadas respecto a la calcita, dolomita y yeso. El resultado es el agua p47, que se consigue simular aportando agua marina al agua p25 y permitiendo interacción con el terreno

Table 6. Results of the chemical evolution between boreholes p25 and p47 of Barra del Chuy after the program PHREEQC. Both waters are under-saturated with respect the calcite, dolomite and gypsum. The result is water p47 that can be simulated by contributing marine water to water p25 and allowing interaction with the ground

menos de intercambio entre las posiciones NaX, KX, MgX₂, CaX₂ (X=complejo mineral con capacidad de intercambio catiónico). El cambio iónico se basa en un proceso de modificación de la salinidad ambiental de la fracción arcillosa. Resulta que la simple mezcla del agua del sondeo p25 (95,79%) y del agua del océano (4,21%) produce un agua que se diferencia de la p47 en que está subsaturada con respecto a la calcita, y muestra un pH más ácido, déficit de Ca, Na y HCO₃, y exceso de Mg y SO₄. Después de la imposición de equilibrio con la calcita al agua mezcla se genera un exceso de Ca y Mg y un déficit de Na, y un pH más próximo al real; finalmente, a la composición así obtenida se le impone el intercambio iónico con arcillas montmorilloníticas, considerando que se está ante un proceso de lavado progresivo del terreno.

Para la última evolución se han de considerar las fracciones equivalentes (β) de cada catión intercambiado en equilibrio con la solución mezcla, siendo β=X / CIC, donde CIC es la capacidad de intercambio catiónico del sedimento y X la concentración del catión (I, J, K, ...) en el sedimento, expresados todos ellos en meq/L/100 g de sedimento seco.

El intercambio obedece a un equilibrio químico con una constante K. Por ejemplo, en el intercambio Na\Ca se cumple:



donde Ca-X₂ y Na-X representan los cationes que ocupan el lugar de intercambio.

Para el citado intercambio las fracciones equivalentes son:

$$\beta_{Na} = \frac{[Na - X]}{[Ca - X_2] + [Na - X]}; \beta_{Ca} = \frac{[Ca - X_2]}{[Ca - X_2] + [Na - X]}$$

Para determinar las posiciones incógnitas intercambiadas en el sedimento se substituye la fracción equivalente correspondiente al par catiónico en cuestión en la constante de equilibrio de ese mismo par:

$$K_{\frac{Na}{Ca}} = \frac{\beta_{Na}[Ca^{2+}]^{0.5}}{\beta_{Ca}^{0.5}[Na^+]}$$

Las constantes de intercambio del Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺; referidos al Na⁺, son, según Bruggenwert y Kamphorst (1982): K_{Na\Ca}}=0,3-0,6; K_{Na\Mg}}=0,4-0,6; K_{Na\K}}=0,15-0,25.

Se obtiene un sistema de ecuaciones del que se despejan las fracciones equivalentes de cada ión y en

función de ellas las concentraciones intercambiadas de los mismos:

$$\beta_{Ca} = \frac{\beta_{Na}^2[Ca^{2+}]}{K_{\frac{Na}{Ca}}[Na^+]^2}; \beta_{Mg} = \frac{\beta_{Na}^2[Mg^{2+}]}{K_{\frac{Na}{Mg}}[Na^+]^2}; \beta_K = \frac{\beta_{Na}[K^+]}{K_{\frac{Na}{K}}[Na^+]}$$

Como por definición se tiene que: β_{Na}+β_{Ca}+β_{Mg}+β_K=1, substituyendo β_{Ca}+β_{Mg}+β_K en función de β_{Na} se obtiene una ecuación cuadrática:

$$\beta_{Na}^2 \left(\frac{[Mg^{2+}]}{K_{\frac{Na}{Mg}}^2[Na^+]^2} + \frac{[Ca^{2+}]}{K_{\frac{Na}{Ca}}^2[Na^+]^2} \right) + \beta_{Na} \left(\frac{[K^+]}{K_{\frac{Na}{K}}[Na^+]} + 1 \right) - 1 = 0$$

Para el caso de la presente simulación el mejor ajuste se logra con los siguientes valores:

$$K_{Na\Mg} = 0,6; K_{Na\Ca} = 0,5; K_{Na\K} = 0,25; \\ CIC \text{ (montmorillonita)} = 80 \text{ meq/100g}$$

en función de los cuales se obtiene:

$$\beta_{Na} = 0,19; \beta_{Ca} = 0,58; \beta_{Mg} = 0,21; \beta_K = 0,02.$$

En el caso del Na, se obtiene:

$$Na-X = b_{Na} \cdot CIC = 15,5 \text{ meq/100 g.}$$

Operando igual para el resto de cationes y expresando el resultado en mmoles/g:

$$Ca-X_2 = 0,233; Na-X = 0,155; Mg-X_2 = 0,083; \\ K-X = 0,014$$

Imponiendo estos valores de intercambio iónico se obtiene una solución teórica muy similar al agua p47 (ver tabla 6), salvo en la concentración de sulfatos que presenta un marcado exceso. Cabe suponer que se ha producido una reducción de sulfatos en el suelo (o en el lecho de los cauces) por la abundante vegetación en medio encharcadizo de los bañados. Este hecho, que afecta al pH, no se ha simulado.

Análisis de la posible relación entre los acuíferos de la Barrera II y la Barrera III

Ninguna de las perforaciones realizadas cerca de la costa tiene suficiente profundidad como para establecer que tipo de relación existe entre los sedimentos arenosos de las barreras II y III en la franja en que presumiblemente pueden estar superpuestas y separadas por arcillas de los depósitos de la Laguna III. Muy probablemente las perforaciones p27 y p28 se hayan

quedado a muy corta distancia de las arenas del acuífero de la barra II, si es que existen allí, pero no han salido de las arcillas. La interpretación conjunta de la información hidrogeológica e hidrogeoquímica apoyaría la posibilidad de acuíferos superpuestos con continuidad del profundo hacia el mar (Almagro, 2001; Almagro y Custodio, 2001):

- a) En las perforaciones que penetran el acuífero de la Barrera II (p29 y p30, Fig. 12) se observa que el nivel piezométrico es de menos de 3 m, mientras que en las perforaciones próximas que penetran sólo la Barrera III (p28 y p27) del nivel piezométrico es superior a 8 m. Esa marcada diferencia en distancias pequeñas sugiere una separación hidráulica entre ambos acuíferos, bien por estar superpuestos con un estrato horizontal de baja permeabilidad que los separa, o bien por desaparecer la Barrera II lateralmente, pero con un área de descarga próxima diferente del mar, que podría ser el Bañado de la Barrita y el tramo inferior del Arroyo Chuy, aunque esta última posibilidad no es coherente con la modelación numérica realizada.
- b) La existencia de la separación aludida se afirma por la diferente amplitud de las variaciones piezométricas, que son de 0,8 m para la Barrera II y de 0,4 m para la Barrera III.

- c) La base de la Barrera III son arcillas ricas en illita mientras que las de la base de la Barrera II lo son en vermiculita, con lo que presumiblemente se trata de horizontes diferentes.
- d) El agua de las perforaciones que penetran la Barrera II en el área considerada tienen una salinidad de 18-23 meq/L, que contrasta fuertemente con la salinidad de 5 a 7 meq L⁻¹ de las aguas de la Barrera III. Esto supone o bien áreas de recarga diferentes, en las que la precipitación sufre muy diferente evapoconcentración y reacción con el terreno (lo que químicamente no parece posible), o bien una de ellas tiene una pequeña adición de agua marina, que como se ha visto puede ser residual de los sedimentos. Si es así, y no es por intrusión marina de origen mareal a través del tramo inferior del Arroyo Chuy, eso quiere decir que se trata de agua de muy lenta renovación: cabe pensar que la Barrera II desaparece hacia la costa, o queda cerrada en forma de fondo de saco, lo que no es coherente con la modelación numérica apoyada en parámetros hidráulicos contrastados y la piezometría real, o bien que se trata del efecto de áreas de circulación restringida localmente o que reciben drenaje vertical de los niveles arcillosos con restos de agua salina. Los suelos más jóvenes

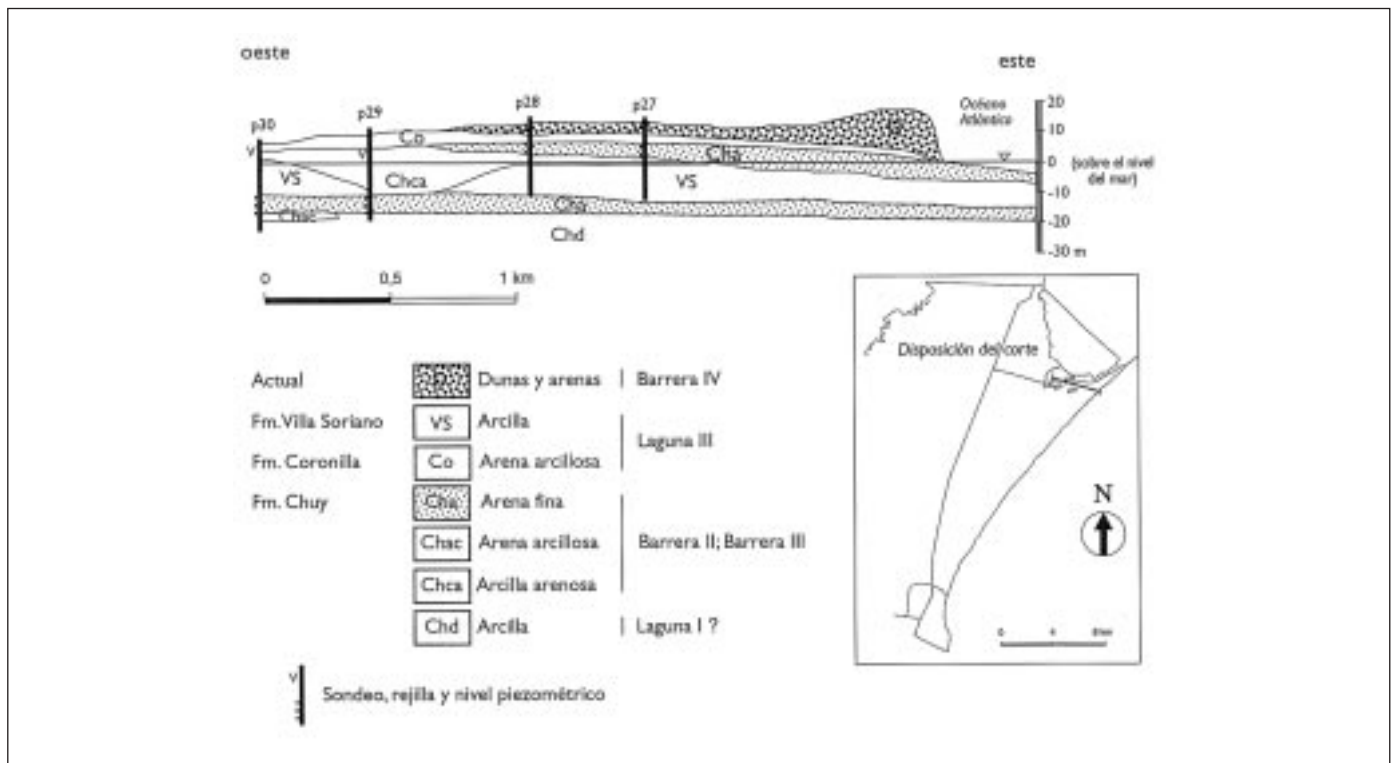


Fig. 12. Corte geológico-hidrogeológico interpretativo de las condiciones en el entorno de Barra del Chuy
 Fig. 12. Geological-hydrogeological cross-section to show the conditions interpreted for the area of Barra del Chuy

y arenosos de la Barrera III explican la menor mineralización, aunque con mayor aporte de CaCO_3 . Todo sigue apuntando hacia una separación.

- e) La modelación numérica estacionaria, como ya se ha dicho, para respetar los valores de los parámetros hidráulicos deducidos de los ensayos de bombeo hace necesaria la existencia del estrato arcilloso entre las arenas de las Barreras II y III, y apoya la posibilidad de que las arenas de la Barrera II y las arcillas de la Laguna III que las recubren se continúen hacia el este hasta la línea de costa o incluso más allá.

Conclusiones

El área del Chuy, y en concreto la Cuchilla de la Angostura, contiene acuíferos arenosos poco profundos que en parte son libres y en parte confinados o semiconfinados bajo depósitos arcillosos y limo-arenosos. Su disposición de detalle corresponde a una secuencia costera de islas-barrera sobre un substrato arcilloso y ocasionalmente granítico, cuya disposición afecta al funcionamiento del agua subterránea. Estos acuíferos son la única fuente significativa de abastecimiento urbano y rural, y por esa razón su explotación racional es esencial para el área, tanto del lado uruguayo como brasileño. La recarga es exclusivamente por infiltración de la lluvia, y varía entre escasos mm/año en áreas con sedimentos de fondo de laguna aflorantes o subyacentes, hasta 25-50 mm/año en las áreas arenosas, y hasta más de 100 mm/año en las dunas y arenales. El flujo se produce hacia la periferia del área, sin cursos de agua significativos, y en esa periferia se produce la descarga a los bañados, directamente al mar a lo largo de la franja costera, o al tramo final del Arroyo Chuy.

El agua es en general de buena calidad química, salvo por algunos contenidos elevados de nitratos en áreas urbanas y periurbanas. La salinidad, que es moderada, varía en función de la evapoconcentración en el suelo -y en algunos lugares a la evapotranspiración freática- lo que explica que haya áreas costeras con suelos muy arenosos en que la salinidad es pequeña, y que se aprecie una incorporación de carbonato cálcico de los restos de carbonatos organógenos fósiles aún no lixiviados, que en otras partes están ya disueltos. Algunos pozos con aguas algo salinas son el resultado de una ligera contaminación marina a partir de restos de aguas marinas en los sedimentos lagunares o de efectos mareales en el tramo final del Arroyo Chuy, no son debidos a intensa evapotranspiración. En el área de Barra del Chuy el

acuífero de la Barrera II está presumiblemente separado del de la Barrera III por sedimentos arcillosos del fondo de la Laguna III y se extiende hacia la costa. A pesar de no existir evidencias a partir de las perforaciones, así se deduce de los datos piezométricos, la modelación numérica y la composición química.

Agradecimientos

Los estudios que han servido de base a la tesis doctoral (Almagro, 2001) que soporta este artículo se han realizado en parte por iniciativa propia y en parte durante el trabajo del primer autor en OSE (Obras Sanitarias del Estado, Montevideo) y con el apoyo de campo de personal del mismo, y en especial de la Arq. Lourdes Rocha. El trabajo de redacción, discusión y preparación se ha realizado en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSICCP de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, y en algunas fases ha tenido el apoyo del Instituto Geológico y Minero de España. Los autores agradecen a los Dres. Enric Vázquez Suñé (DIT-UPC) y Javier Rodríguez Arévalo (IGME) sus observaciones y sugerencias para la mejora del texto.

Referencias

- Alcalá, F. y Custodio, E. 2004. Nuevos datos sobre el aporte de cloruro al terreno por deposición total en España. 4ª *Asamblea Luso-Española de Geodesia y Geofísica*. Figueira da Foz: 731-732.
- Almagro, L. 2001. *Funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos superiores de la Formación Chuy (región Sudeste del Uruguay)*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Almagro, L., Custodio, E., Rocha, L. y Abelenda, D. 1988a. Hidrogeología del acuífero superior de la formación Chuy (SO del Uruguay). 1: Modelo conceptual. *IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Montevideo/Asoc. Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo. 1: 374-390.
- Almagro, L., Vives, L., Custodio, E. y Rocha, L. 1988b. Hidrogeología del acuífero superior de la Formación Chuy (región sudeste del Uruguay). 2: Modelo numérico. *IV Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Montevideo/Asoc. Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo. 1: 391-404.
- Almagro, L. y Custodio, E. 2001. Hipótesis sobre la disposición de la formación Chuy en la franja costera en la región SE del Uruguay. *XI Congreso Latinoamericano de Geología*. Montevideo: 1-7 (edición electrónica en CD).
- Bossi, J. 1965. *Geología del Uruguay*. Universidad de la República Montevideo-Uruguay.
- Bossi, J. y Navarro, R. 1998. *Geología del Uruguay*. Universidad de la República Montevideo-Uruguay.

- Bossi, J. y Umpierre, M. 1975. Magmatismo mesozoico de Uruguay y Río Grande del Sur, sus recursos minerales asociados y potenciales. *II Congreso Iberoamericano de Geología Económica*, Buenos Aires, Argentina: 119-142.
- Bruggenwert, M.G.M. y Kamphorst, A. 1982. Survey of experimental information on cation exchange in soil systems. In: G.H. Bolt (Ed.), *Chemistry, B. Physico-chemical models*. Elsevier, Amsterdam, 141-203.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, 2ª ed., Barcelona, 1983.
- Eochard, M. 1970. *Informe geomorfológico sobre el relevamiento detallado de las hojas Santa Teresa y Los Indios (Dpto. de Rocha)*. Dirección de Suelos y Fertilizantes, Ministerio de Agricultura y Pesca. Uruguay.
- Francis, J. y Mones. 1975. Esquema bioestratigráfico de la R.O. del Uruguay. *Actas del I Congreso Argentino Paleontológico*, Tucumán, Argentina. 2: 539-568.
- Martin. 1982. Primera ocurrencia de corais pleistocénicos da costa brasileira: datação do máximo da penúltima transgressão. *Ciencias da Terra*, 1: 16-17.
- Parkhurst, D.L. y Appelo, C.A.J. 1999. User's guide to PHREEQC (versión 2): a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, *Water-Resources Investigations Report*, 99-4259, Denver, Colorado.
- Samper, J. y García Vera, M. 1997. *Programa VISUAL BALAN v0, manual del usuario*. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Sprechmann, P. 1978. The paleoecology and paleogeography of the uruguayan coastal area during the Neogene and Quaternary. *Zitteliana* (4), Munich.
- Tardy, Y. 1971. Characterisation of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. *Chem. Geol.*, 7: 253-271.
- Tomazelli, L. 1985. Contribuição ao conhecimento das fácies de ambiente praial a partir de elementos do Pleistoceno costeiro do Río Grande do Sul. *Anais do 2º Simposio Sul-Brasileiro de Geologia*, Florianópolis, SBG: 325-338.
- Tomazelli, L. 1990. *Contribuição ao estudo dos sistemas deposicionais holocénicos do nordeste da Provincia Costeira do Rio Grande do Sul, com ênfase no sistema eólico*. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (POA-Brasil). Tese de Doutorado: 1-270 (Inédito).
- Villwock, J. 1994. *Mapa geológico da Provincia Costeira do Rio Grande do Sul*. Instituto de Geociencias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (POA-Brasil).
- Villwock, J. y Tomazelli, L. 1995. *Geología costeira do Rio Grande do Sul*. Notas técnicas, nº 8. Instituto de Geociencias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (POA-Brasil).
- Villwock, J. y Tomazelli, L. 1998. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. Centro Austral de Investigaciones Científicas & Universidad Nacional de la Patagonia, Tierra del Fuego. Balkema, Rotterdam-Brookfield.

Recibido: junio 2004
Aceptado: agosto 2004