

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ (SAG) EN LOS ALREDEDORES DE LA CIUDAD DE TACUAREMBÓ, URUGUAY: APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GOD Y DRASTIC

Roberto CARRIÓN

Didier GASTMANS

Gerardo VEROSLAVSKY

RESUMEN

La sostenibilidad del recurso agua es de suma importancia sea superficial o subterráneo. Este trabajo encara la protección del Acuífero Guaraní en el área de la ciudad de Tacuarembó, capital del departamento homónimo. La evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y del riesgo de contaminación del acuífero aportaron el conocimiento necesario para la planificación de su uso, aspecto que debería ser considerado en los planes de ordenamiento del territorio en esa ciudad. Se aplicaron dos métodos para la determinación de la vulnerabilidad, GOD y DRASTIC. La aplicación de estos métodos mostró diferencias en las determinaciones de la vulnerabilidad, ya que el primero toma menos parámetros para su evaluación que los considerados por el segundo. No obstante, la aplicación de uno u otro depende principalmente de los datos e información que se tengan disponibles del área en estudio. Se observó que el método GOD resulta más restrictivo que DRASTIC: en el primero considera que el 24.3% del área presenta *alta vulnerabilidad*, mientras que DRASTIC la considera 16.8%, en el caso de *moderada* GOD clasifica el 56.2% como tal, mientras que DRASTIC la clasifica en un 76.3%. En cuanto al área que ocupa la *vulnerabilidad baja* del área, DRASTIC es algo menos restricto que GOD ya que el primero abarca un área 6.8% mayor, mientras que GOD la restringe a un 19.6%.

Palabras-clave: Vulnerabilidad; Sistema Acuífero Guaraní; Hidrogeología; Uruguay.

ABSTRACT

GUARANÍ AQUIFER SYSTEM (GAS) VULNERABILITY EVALUATION WITHIN THE TACUAREMBÓ MUNICIPALITY SURROUNDINGS, URUGUAY: APPLICATION OF THE GOD AND DRASTIC METHODS. The sustainability of the water resources is of utmost importance, whether surface or groundwater. This work addresses the protection of the Guaraní Aquifer in the Tacuarembó municipality, capital of the homonymous department in Uruguay. Evaluating the intrinsic vulnerability and the risk of contamination of the aquifer provided the necessary knowledge to plan its use. It should also be considered in the territorial planning plans in that city to manage the resources better. GOD and DRASTIC methods were applied to determine vulnerability. The application of these methods showed differences in vulnerability determinations since the first takes fewer parameters for its evaluation than those considered by the second. However, applying one or the other depends mainly on the data and information available in the area under study. It was observed that the GOD method is more restrictive than DRASTIC: in the first, it considers that 24.3% of the area has a high vulnerability, while DRASTIC considers it 16.8%; in the case of moderate GOD classifies 56.2% as such, while DRASTIC classifies it at 76.3%. Regarding the area occupied by the low vulnerability of the area, DRASTIC is somewhat less restricted than GOD since the former covers an area 6.8% larger, while GOD restricts it to 19.6%.

Keywords: Vulnerability; Guaraní Aquifer System; Hydrogeology; Uruguay.

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo constituye un análisis ambiental que sustenta la necesidad de protección del acuífero como forma de preservar el recurso agua, teniendo en cuenta la importancia de las aguas subterráneas en el desarrollo humano. A partir de la elaboración de un conjunto de mapas que muestran la vulnerabilidad ante la contaminación por posibles fuentes introducidas en la superficie, se obtuvieron varios productos que permiten a las autoridades y gestores, sobre base técnica, su uso en el ordenamiento del territorio.

La determinación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero fue evaluada mediante los métodos GOD y DRASTIC, ambos ampliamente aplicados y difundidos en hidrogeología. Estos métodos presentan diferencias importantes a la hora de obtener los parámetros geológicos e hidrogeológico para su aplicación. La falta de disponibilidad de información confiable, número de datos y densidad de la información, y muchas veces inexistente hace que la aplicación de unos de estos o de ambos sea extremadamente difícil.

En este caso de estudio se contó con información existente (CARRIÓN 1991, MONTAÑO 2005, COLLAZO 2006, POCHINTESTA 2018) tanto geológica como hidrogeológica, la cual fue complementada con datos e información que fueron obtenidos para una tesis de maestría (CARRIÓN 2023), lo que ha permitido un mejor ajuste de los parámetros utilizados para la utilización de ambos métodos.

La evaluación de la vulnerabilidad por ambos métodos permitió tener una visión más detallada en cuanto a la representatividad de cada uno de estos métodos, teniendo en cuenta la información que es necesaria para la aplicación de cada uno, y como resolver el problema de la afectación del agua subterránea cuando se planifica el ordenamiento del territorio.

Es importante destacar que parte de los resultados que se presentan formaron parte del proyecto que abarca el área aflorante del SAG en Uruguay, “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay”, financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII_FMV_1_2019_1_155736).

2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Socio económicas

El área de estudio comprende la ciudad de Tacuarembó, capital del departamento homónimo, que está situada en la región centro – norte de Uruguay a orillas del Arroyo Tacuarembó Chico, a 380 km de la ciudad de Montevideo y a sólo 100 km de las ciudades fronterizas de Rivera y Santana do Livramento. La población que se asienta sobre el área es de 59.545 habitantes con un total de 20.420 hogares siendo el 52% mujeres (INE 2011).

La ciudad es un importante centro comercial, educativo, de servicios y, por su estratégica posición geográfica, constituye un nodo de infraestructura y comunicaciones que apoya gran parte de la actividad económica que se desarrolla en la región centro-norte de Uruguay. Su área de influencia es amplia, la que incluye a estancias ganaderas (vacuna y ovina), con producción cereales y oleaginosas (MIDES 2020). En los últimos veinte años, se destaca el desarrollo y expansión de la actividad forestal (pinos y eucaliptos) así como, más recientemente, la generación de energía no tradicional (plantas de biomasa y parques eólicos). La disponibilidad de los recursos naturales señalados hace que Tacuarembó tenga un desarrollo socioeconómico ligado también a la industria cárnica – frigorífica, las molineras arroceras y harineras, al funcionamiento de aserraderos e industrias de mayor porte relacionadas a la transformación de la madera.

2.2 Medio físico

El área de estudio comprende aproximadamente 500 km² formando parte de esta los afloramientos de las formaciones Rivera y Tacuarembó (4860 km²), unidades constituyentes del SAG. Estas se exhiben en la región central de la Cuenca Norte a través de una franja de areniscas de 160 km de largo y 35-50 km de ancho que, con dirección NNE, se desarrollan en los departamentos de Rivera y Tacuarembó (Figuras 1 y 2). La ciudad de Tacuarembó se implanta directamente sobre las unidades geológicas antes mencionadas.

Las formaciones Rivera y Tacuarembó pueden aparecer en contacto con los basaltos de la Formación Arapey (VEROSLAVSKY *et al.* 2024) mientras que, hacia la base, es exclusivamente la Formación Tacuarembó la que se apoya en discordancia sobre las areniscas y arcillitas rojizas de la Formación Buena Vista (Pérmico Superior).

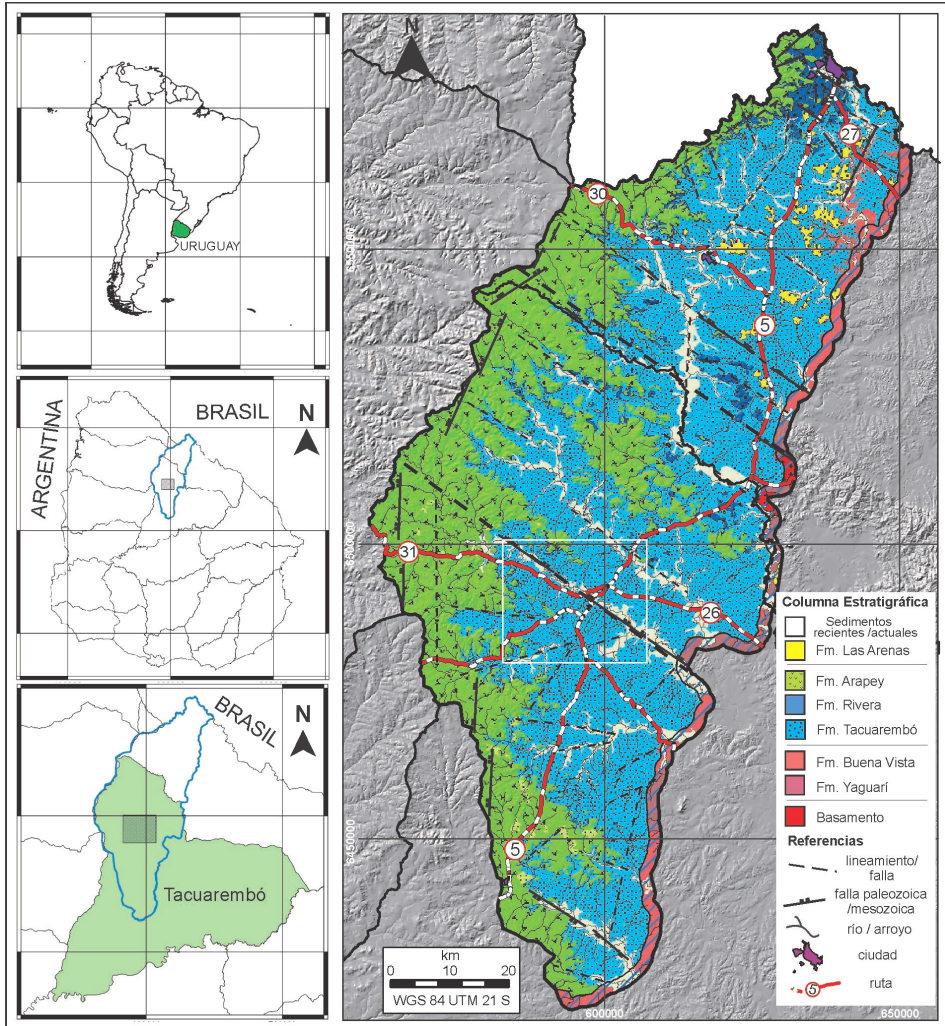


FIGURA 1 – Ubicación del área de estudio y contexto geológico regional.

FIGURE 1 – Location of the study area and regional geological context.

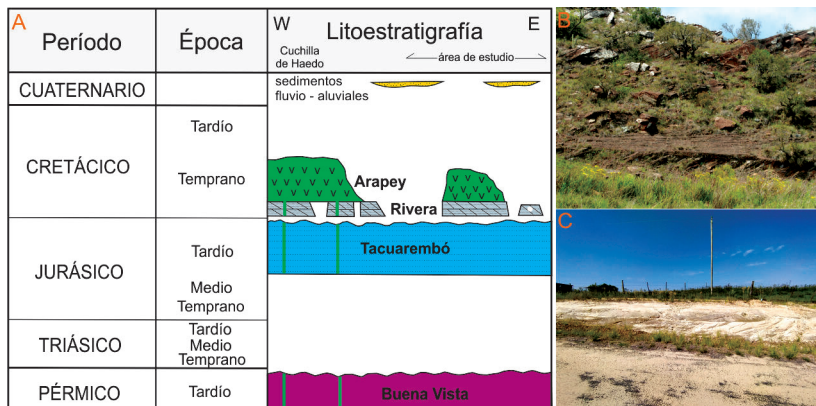


FIGURA 2 – (a) Columna litoestratigráfica del área de estudio, (b) Afloramiento de la Formación Rivera y (c) Afloramiento de la Formación Tacuarembó en el área de estudio.

FIGURE 2 – (a) Lithostratigraphic column of the study area, (b) Rivera Formation outcrop and (c) Tacuarembó Formation outcrop in the study area.

El espesor promedio del SAG en el área de estudio está en torno de 80 a 100 m, aspecto que se ha verificado en varios de los pozos aquí estudiados. La Formación Rivera en el área de estudio se desarrolla en forma saltuaria y posee espesores entre 2 a 5 m.

Las formaciones Tacuarembó y Rivera encuentran fácil correlación con sus equivalentes Guará y Botucatu, respectivamente, en el Sur de Rio Grande do Sul (DO REIS *et al.* 2019).

Geomorfológicamente, el área comprende las denominadas lomadas y colinas sedimentarias (PANARIO 1988) labradas sobre las areniscas del SAG y que se desarrollan entre las cotas 180 y 200 m, así como las planicies fluviales asociadas a los cursos de los arroyos Tacuarembó Chico y Tres Cruces. Subordinadamente, aparecen lomadas basálticas hasta mesetiformes, controladas por

relictos de la Formación Arapey. Cabe señalar que el relieve muestra una suave pendiente de Oeste a Este, comportamiento que está relacionado con el control que ejerce la Cuchilla de Haedo la que, con dirección NNE a N-S, exhibe alturas entre 330 a 240 m.

Los suelos arenosos que han sido clasificados como Acrisol Ocrico Típico Arenoso o Planosol / Brunosol Lúvico, en un 80% del área (MGAP-DGRN 2002).

En lo referente al clima, dentro de la clasificación del territorio continental de Uruguay, al área le corresponde el tipo Koeppen “Cfa”, en promedio se tiene que la temperatura y precipitación media anual son de 23.1 °C y 1547±461 mm/año, respectivamente, a partir de los datos de la estación del INIA situada en Tacuarembó (Figuras 3 y 4, INIA-GRAS 2022).

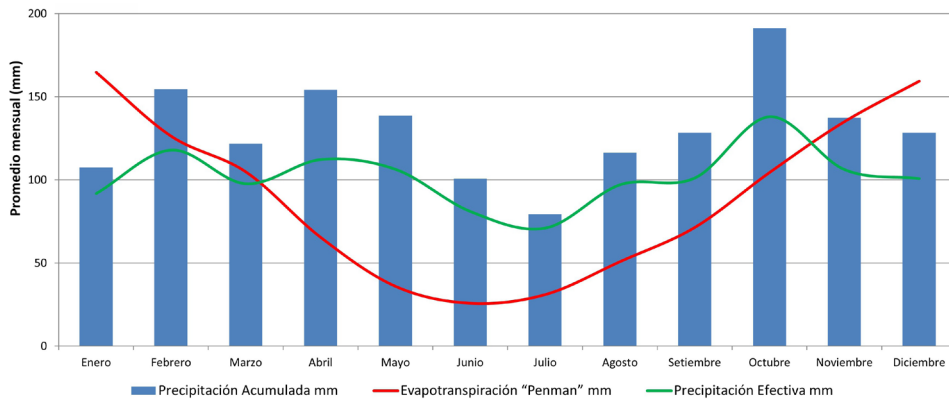


FIGURA 3 – Promedios mensuales para el período 2001-2021 de precipitación acumulada, efectiva y evaporación Penman (Fuente: INIA GRAS).

FIGURE 3 – Monthly averages for the period 2001-2021 of accumulated and effective precipitation and Penman evaporation (Source: INIA GRAS).

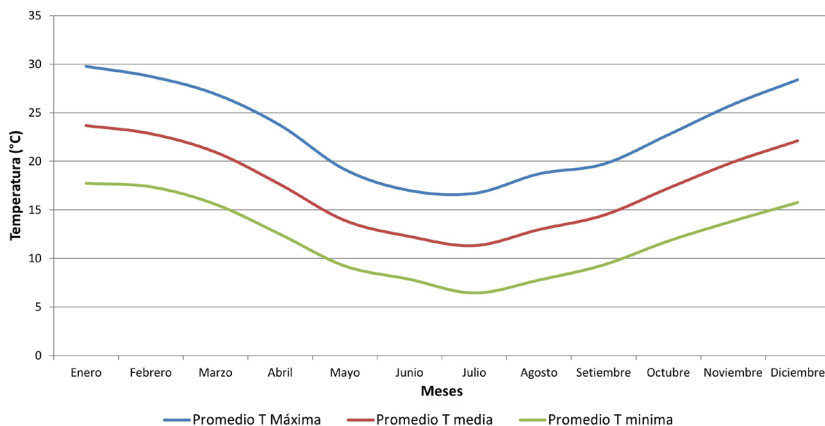


FIGURA 4 – Promedios mensuales para el período 2001-2021 de temperaturas, máxima, media y mínima (Fuente: INIA GRAS).

FIGURE 4 – Monthly averages for the period 2001-2021 of maximum, average and minimum temperatures (Source: INIA GRAS).

3 EL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo. Se encuentra localizado entre los paralelos 16° y 32° Sur y los meridianos 47° y 60° Oeste, ocupa un área de unos 1.100.000 km² (GASTMANS et al. 2012). Es la unidad hidroestratigráfica más importante de la región meridional del continente sudamericano y tiene su ocurrencia asociada a rocas sedimentarias mesozoicas, esencialmente arenosas, que forman parte del relleno Paleozoico y Mesozoico de las cuencas de Paraná (Brasil y Paraguay), Chacoparanense (Argentina) y Norte (Uruguay).

El término SAG representa la unificación de la nomenclatura que durante las décadas de 1970 y 1990 se denominó, entre otras, como Acuífero Botucatu (GILBOA et al. 1976) o Acuífero Gigante del Mercosur (ARAÚJO et al. 1995). Cabe recordar también que este acuífero mantenía varias denominaciones locales relacionadas con los nombres de las unidades litoestratigráficas como, por ejemplo, el acuífero Tacuarembó en territorio uruguayo (BUQUET 1943).

En 2009, el Informe Final de Hidrogeología del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del SAG propuso una definición operativa y de alcance regional sobre las unidades constituyentes del SAG (GASTMANS et al. 2012). Ese criterio es adoptado aquí por lo que, en el área de estudio, el SAG está constituido por la Formación Tacuarembó (en el sentido de BOSSI 1966, BOSSI et al. 1975). Sin embargo, como señalado, se ha preferido aquí separar y cartografiar a la Formación Tacuarembó, con el mismo alcance litoestratigráfico, en dos formaciones, de base a techo, Tacuarembó y Rivera tal como han propuesto FERRANDO et al. (1987) y VEROSLAVSKY & MANGANELLI (2018).

Entre los trabajos regionales de significación y cuño hidrogeológico que abarcan el área de estudio se destacan: IPT (1980), TAHAL (1996), MONTAÑO et al. (1998), las cartas hidrogeológicas elaboradas por el Servicio Geológico de Uruguay - DINAMIGE - realizadas por HEINZEN et al. (1987, 2003) y TECHERA et al. (2017), MONTAÑO & CARRIÓN (1990), Informe Final de Hidrogeología do Proyecto Acuífero Guaraní (LEBAC 2008), MANGANELLI et al. (2021) y GASTMANS et al. (2022). Otros trabajos, a escala de mayor detalle, fueron realizados por CARRIÓN (1991), MONTAÑO (2005), COLLAZO (2006)

y POCHINTESTA (2018). Estos dos últimos incluyen la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero por el método GOD y DRASTIC, respectivamente. COLLAZO (2006) abarca toda el área aflorante del SAG en Uruguay a escala menor (1:250.000) mientras que POCHINTESTA (2018) utiliza solo DRASTIC, presentando una menor definición de los parámetros que utiliza el método.

4 METODOLOGÍA

4.1 Base de datos

Se tomó el Modelo Digital de Terreno del área de estudio a escala 1:50.000 con una resolución espacial de 32 x 32 cm, con una precisión de interpolación entre puntos de 2.5 m a partir de los datos e información de las capas de acceso público disponible en el sitio web de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE 2022) de los relevamientos de 2017 y 2018.

Se construyó el mapa geológico del área de estudio a escala 1:50000 a partir de la recopilación de los principales antecedentes (PRECIOZZI et al. 1985, BOSSI & FERRANDO 2001, POCHINTESTA 2018) a los que se sumaron levantamientos geológicos que oficiaron de control de campo a efectos de verificar y ajustar límites de las unidades litoestratigráficas así como una mejor caracterización de las mismas.

Se realizaron estudios sedimentológicos y estratigráficos de recortes de roca en los pozos disponibles en la litoteca de DINAMIGE para revisar y evaluar los pases formacionales. Asimismo, se contó con la información de las bases de datos de pozos de OSE, DINAGUA y la empresa perforadora GEO AGUAS SUBTERRÁNEAS LTDA. La base de datos elaborada en este trabajo fue compartida con el proyecto “ANII_FMV_1_2019_1_155736”. Todo este conjunto permitió la elaboración de cortes geológicos que contribuyeron a la definición de la configuración geológica del subsuelo y la elaboración del modelo hidrogeológico propuesto para el área de estudio.

En total, se utilizaron 295 perforaciones seleccionadas de una base de información más amplia que contaban con información variada y confiable (profundidad, caudal, nivel estático y dinámico, perfil geológico, ubicación, principalmente), la cual toma datos de distintas épocas, principalmente de cuando fueron construidas las captaciones. Toda esta información fue incorporada al Sistema de Información

Geográfico del Piloto Tacuarembó (SIGPT), y se uniformizaron los términos utilizados por las distintas bases consultadas.

4.2 Hidrogeología

La integración de la información geológica y la base de datos de perforaciones permitió la evaluación del sistema acuífero del área. En primer lugar, se definió la extensión y distribución espacial de las unidades constituyentes del acuífero, así como las relaciones estratigráficas de estas con las unidades supra e infrayacentes. En base a las perforaciones, se define el espesor de la capa acuífera y las posibles interrupciones del flujo por las estructuras geológicas existentes (lineamientos y fallas).

A partir de la selección de pozos con datos confiables de niveles estáticos y su acotamiento por medio del MDT, se elaboraron mapas de piezometría con curvas cada metro con el objetivo de inferir el flujo del agua subterránea. A su vez, se incorporaron datos e información sobre la química e isotopía del agua recabada en la base de datos a la que se le incorporaron análisis químicos e isotópicos de muestras de agua (superficial y subterránea) realizadas para este trabajo.

Los parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas y superficiales colectadas fueron determinadas en el Laboratorio de Agua y Suelos del Departamento del Agua, Centro Universitario de Norte (UDELAR), bajo los métodos: para alcalinidad APHA_2320-B; conductividad eléctrica APHA_2520-B; sólidos totales disueltos APHA_2540-C y cromatografía iónica APHA_4110-B con cromatógrafo Dionex Aquion Ion.

Los estudios isotópicos se realizaron en el Laboratorio de Isótopos Estáveis do Departamento de Geología Aplicada (Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP). Las determinaciones isotópicas se realizaron con espectrómetro marca Los Gatos Research INC, y los resultados son expresados con relación al VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Como padrones secundarios se utilizaron USGS-45 ($\delta^2\text{H} = -10,3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -2,24\text{‰}$), USGS-46 ($\delta^2\text{H} = -236,0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -29,80\text{‰}$) y un padrón interno (Cachoeira de Emas-CE - $\delta^2\text{H} = -36,1 \text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -5,36\text{‰}$). Los padrones del USGS fueron empleados para la normalización de los resultados para V-SMOW2-SLAP2, el padrón CE fue utilizado para control de la calidad interna y de desvíos. La precisión

analítica fue de $\pm 1,2 \text{‰}$ (1σ) para $\delta^2\text{H}$, $\pm 0,2 \text{‰}$ (1σ) para $\delta^{18}\text{O}$.

4.3 Vulnerabilidad GOD

El método GOD (*Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Deph to groundwater table*, FOSTER 1987, FOSTER & HIRATA 1988, FOSTER et al. 2002) para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos ha sido ampliamente probado en América Latina y el Caribe durante la década de los 90, debido a su claridad conceptual y a la simplicidad para su aplicación.

El índice de vulnerabilidad GOD, caracteriza a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en función de los siguientes parámetros:

- Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración.
- Ocurrencia del sustrato sobreyacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes
- Distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados.

Una vez definidos los parámetros que se proponen se aplica la fórmula: $V_{\text{GOD}} = G \times O \times D$

En la tabla 1 se indican los valores que toma GOD para definir los grados de vulnerabilidad, cuyos valores están comprendidos entre 0 y 1.

TABLA 1 – Clasificación de la vulnerabilidad según método GOD.

TABLE 1 – Vulnerability classification according to the GOD method.

<i>Clasificación</i>	<i>Vulnerabilidad</i>
0.1	Despreciable
0.1-0.3	Baja
0.3 -0.5	Media
0.5 -0.7	Alta
0.7 -1.0	Extrema

4.4 Vulnerabilidad DRASTIC

El método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero fue desarrollado en los años '80 y publicado por el USEPA, bajo

el título “*DRASTIC, A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*” (ALLER et al. 1987). El mismo propone una metodología que permita evaluar el potencial de contaminación de las aguas subterráneas de cualquier sistema hidrogeológico que se pueda evaluar con la información existente del área en estudio.

Esta metodología ha sido diseñada para incluir sólo los factores hidrogeológicos que presentan influencia en una posible polución potencial del acuífero, se consideran las características físicas que pueden afectar la posible contaminación. La disponibilidad de datos cartografiados que son necesarios para evaluar los factores que controlan la potencial de contaminación de las aguas subterráneas son: D = profundidad del agua, R = recarga neta del acuífero, A = tipo de litología del acuífero, S = tipos de suelos que se superponen al acuífero, T = topografía del área, I = zona vadosa y C = conductividad hidráulica del acuífero

Una vez obtenidos los productos anteriores se plantea la fórmula siguientes:

$$V_{DRASTIC} = D \times 5 + R \times 4 + A \times 3 + S \times 2 + T \times 1 + I \times 5 + C \times 3$$

La clasificación del índice de vulnerabilidad según DRASTIC se clasifica según el detalle que luce en la tabla 2.

TABLA 2 – Clasificación de la vulnerabilidad según método DRASTIC.

TABLE 2 – Vulnerability classification according to the DRASTIC method.

<i>Clasificación</i>	<i>Vulnerabilidad</i>
23 - 64	Muy baja
65 - 105	Baja
106 - 146	Moderada
147 - 187	Alta
188 - 230	Muy alta

5 RESULTADOS

5.1 Geología

El mapa geológico elaborado muestra la distribución espacial de las unidades que componen el SAG en el área de estudio (Figura 5). La mayor parte comprende a los afloramientos de la Formación Tacuarembó (Figura 6), la que reúne a una sucesión de estratos de areniscas finas a medias, blanquecinas, en ocasiones algo rojizas, cuarzo-feldespáticas, con estratificaciones horizontales y

cruzadas, con intercalaciones de niveles pelíticos verdosos a rojizos y también, lentes de areniscas más gruesas con intraclastos. En promedio, esta unidad presenta un espesor entre 80 – 100 m en el área de estudio, tal como se pudo observar en perforaciones profundas como: Tacuarembó A1, Bañado de Rocha, Ruta 5 y 36, Reductora de UTE Tacuarembó, las que fueron analizadas en la litoteca de la DINAMIGE (Figura 7).

La Formación Rivera tiene muy escaso desarrollo en el área y comprende a areniscas finas a medias, de tonalidades marrones a rojizas, cuarzo-feldespáticas, con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte como rasgo distintivo (Figura 5). Sus clastos suelen estar recubiertos por manchas y pátinas de óxido de hierro y, en ocasiones, presentan niveles fuertemente silicificados. El espesor de la unidad en el área está en el orden de 2-5 m.

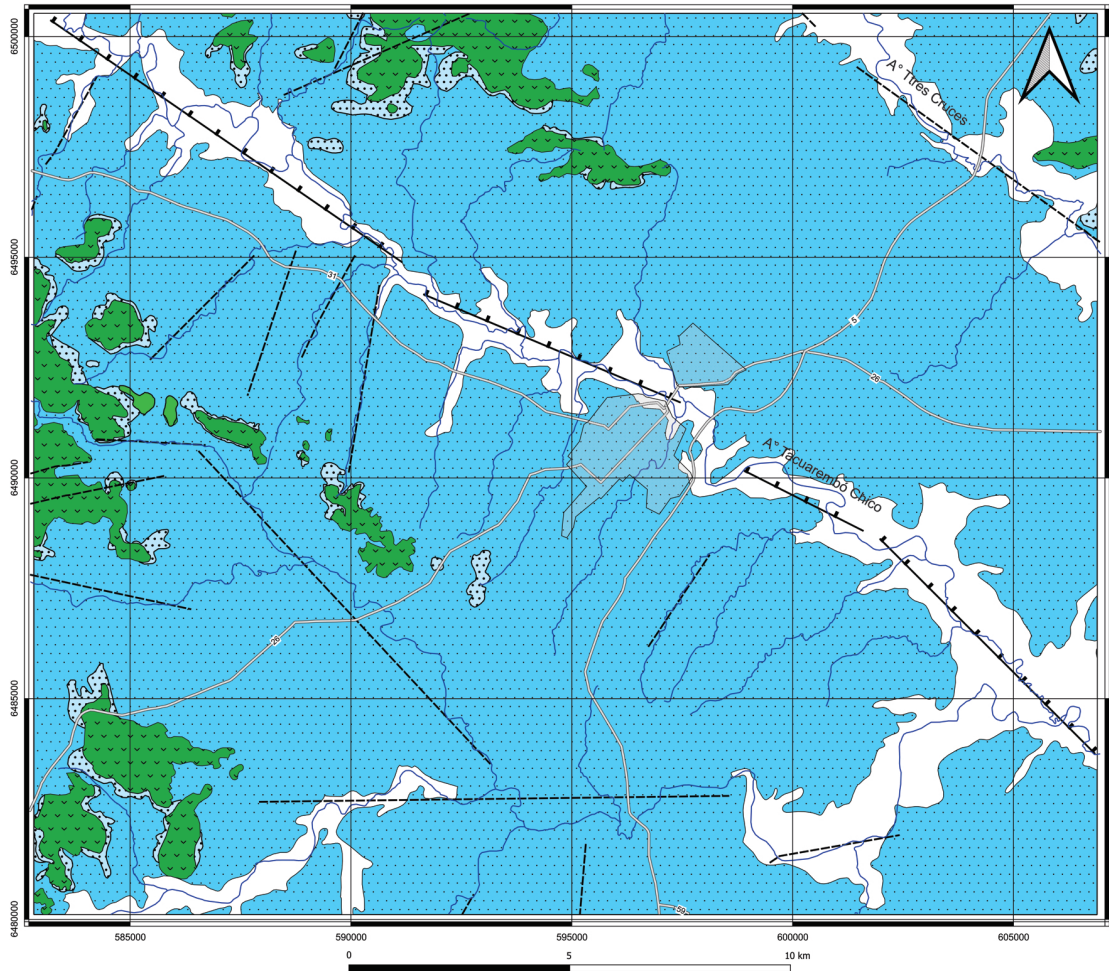
Las unidades del SAG aparecen cubiertas en escasos sectores del área de estudio por los basaltos cretácicos de la Formación Arapey y sedimentos modernos que conforman las terrazas y las planicies de los principales cursos de agua. En toda el área de estudio, las areniscas de la Formación Tacuarembó se apoyan en discordancia sobre las areniscas y arcillitas rojizas de la Formación Buena Vista, aspecto que se ha verificado en varios de los pozos mencionados. La figura 6 muestra la configuración estratigráfica y estructural del área de estudio.

5.2 Hidrogeología

En la figura 8 se presenta el mapa hidrogeológico del área de estudio. El mismo resume la interpretación del funcionamiento del acuífero en base a la información geológica, hidroquímica, isotópica, perforaciones, perfiles geológicos, que se presenta según las orientaciones dadas por STRUCKMEIER & MARGAT (1995).

La circulación de aguas subterráneas acompaña la topografía del terreno y es casi coincidente con el escurrimiento superficial, si observamos la divisoria de aguas subterráneas y superficiales son similares. Solo cuando existen cobertura de rocas basálticas se considera el acuífero confinado, cuando esto no ocurre el mismo es identificado como libre a semi libre.

A nivel general del área se puede decir que la circulación es en general Oeste - Este, ahora bien, cuando se analiza en área de menor tamaño la circulación se da en dirección a los cursos de aguas superficiales, los cuales funcionan como punto de descarga de las aguas subterráneas, y



MAETRIA EN GEOCIENCIAS
ROBERTO CARRIÓN



**ÁREA PILOTO TACUAREMBÓ
MAPA GEOLÓGICO**

Referencias Geológicas

Columna Litoestratigráfica

	Cobertura Sedimentos Reciente y actual	arenas, limos, arcillas, gravas
	Formación Arapey Cretácico Inferior	areniscas intertrapps basaltos
	Formación Rivera Cretácico Inferior	areniscas
	Formación Tacuarembó Jurásico Superior	areniscas

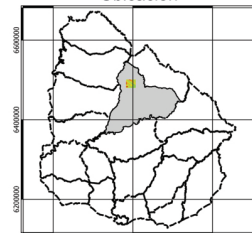
Estructuras

- Fallas
- Lineamientos

Referencias Geográficas

- Red hidrográfica principal
- Rutas principales

Ubicación



Fuentes consultadas

Carrión R. 1991. Hidrogeología en torno a la ciudad de Tacuarembó. Trabajo de grado, Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias, 45 pgs (inédito).

Preciozzi F., Spoturno J., Heinzen W., Rossi P., 1985. Carta geológica del Uruguay, 1: 500.000. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo, 90 pgs.

Pochintesta L., 2018. Importancia del conocimiento del medio físico en el ordenamiento territorial: estudio de caso Ciudad de Tacuarembó y alrededores, Trabajo de grado, Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias, 164 pgs (inédito).

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 21 J
Proyección: Mercator Transversal
Datum: WGS 84
Falso Este: 500.000
Falso Norte: 10.000.000
Meridiano central: -57.0000
Factor de escala: 0.9998
Latitud de origen: 0,0000
Unidad: Metros

FIGURA 5 – Mapa geológico de la ciudad de Tacuarembó y alrededores.

FIGURE 5 – Geological map of the city of Tacuarembó and surroundings.

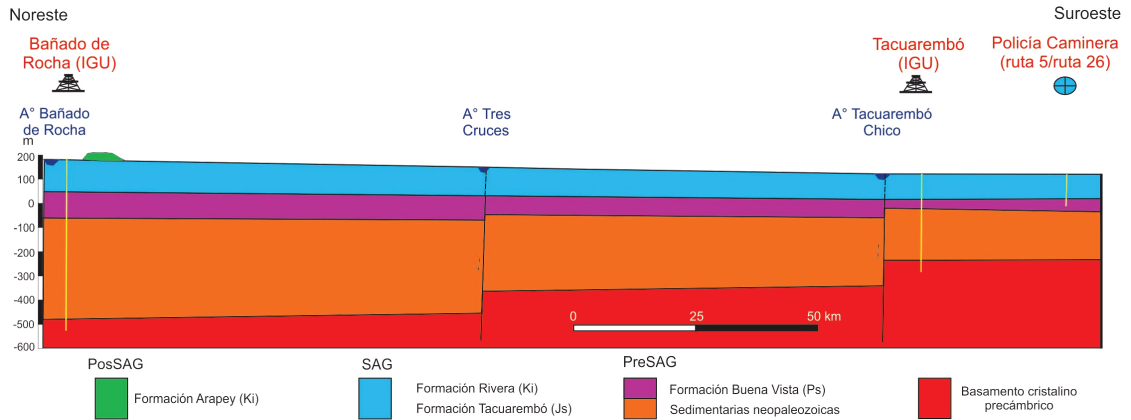


FIGURA 6 – Corte geológico NE – SW del área de estudio.

FIGURE 6 – NE - SW geological section of the study area.



FIGURA 7 – A: Actividades de descripción litológica realizada a partir de “cuting” de pozos conservados en la litoteca de DINAMIGE (izquierda), B: detalle de algunas muestras del pozo Bañado de Rocha (derecha), uno de los pozos de referencia para analizar los espesores de la Formación Tacuarembó en el área de estudio.

FIGURE 7 – A: Lithological description activities carried out from cuttings of wells preserved in DINAMIGE’s lithological library. (left), B: Detail of some samples from the Bañado de Rocha well (right), one of the reference wells to analyze the thicknesses of the Tacuarembó Formation in the study area.

se presentan divisorias de aguas bien marcadas que son coincidentes con las divisorias de aguas superficiales.

Cabe señalar además que las direcciones de flujo de Oeste a Este que muestra la piezometría del SAG en el área de estudio, es coincidente con lo propuesto por GASTMANS et al. (2022) sobre el comportamiento de las direcciones de flujo en el acuífero a lo largo de toda el área de afloramiento en territorio uruguayo.

5.3 Hidroquímica e isotopía

Para este trabajo se tomaron muestras para obtener información actual de la calidad

fisicoquímica del agua subterránea y para la determinación isótopos naturales (^{18}O y ^2H) del agua del acuífero y superficial a los efectos de comparar las mismas. Los resultados de laboratorio se indican en las tablas 3 y 4 y en la figura 9 se muestran los puntos de muestreo.

El agua del acuífero se puede clasificar en general, a partir de la información que nos brindan los diagramas de Piper y Shoeller en Bicarbonatada Cálcica Sódica (Figuras 10 y 11). Se tiene un sesgo a sódica se presenta en las muestras M10 y M15 el sodio.

Los resultados de isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$, se tienen valores que promedian $-4.10 \pm 1.34\%$ para el

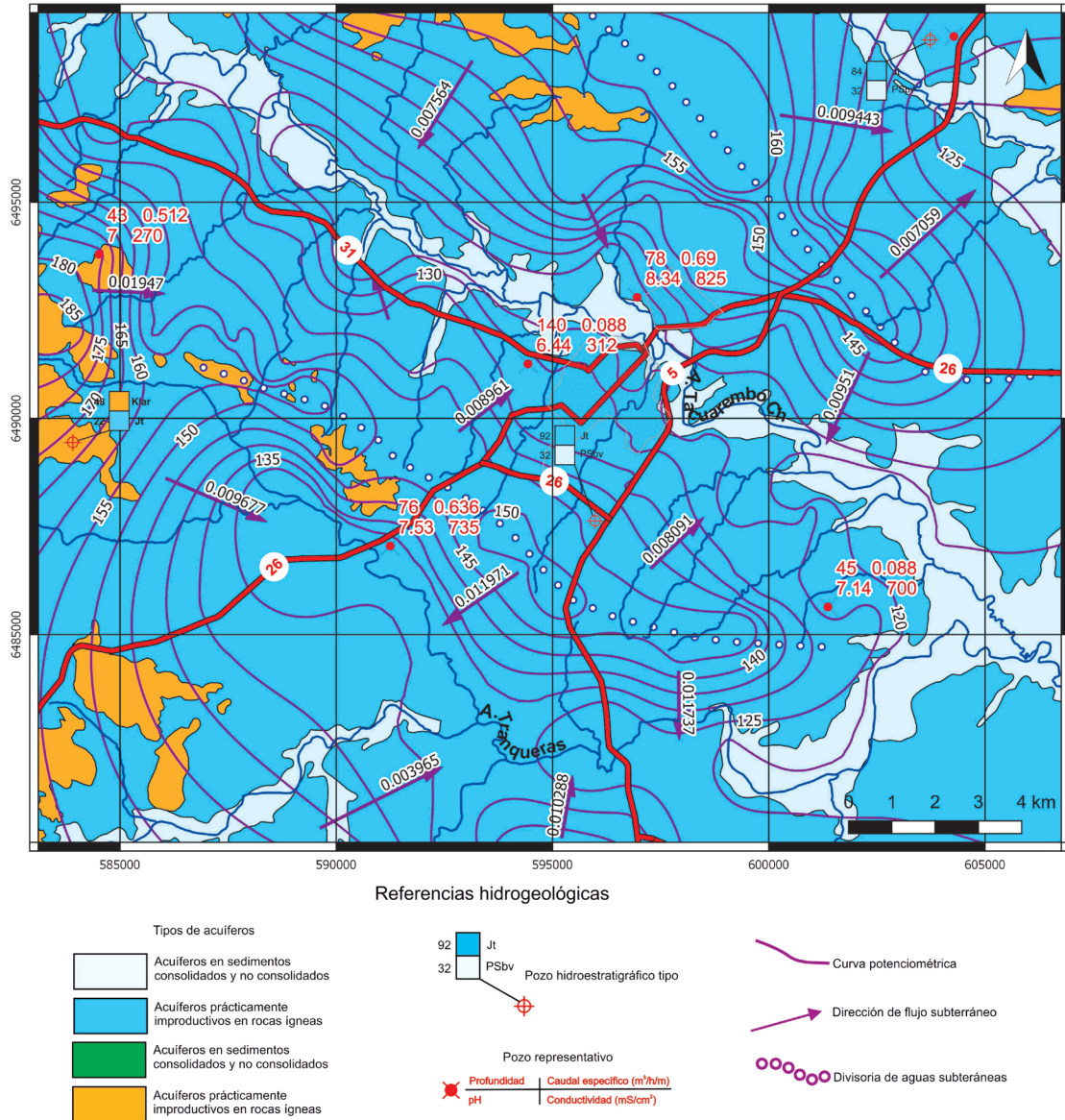


FIGURA 8 – Mapa hidrogeológico de la ciudad de Tacuarembó y alrededores.

FIGURE 8 – Hydrogeological map of the city of Tacuarembó and surrounding area.

TABLA 3 – Resultados analíticos de muestras de aguas subterráneas.

TABLE 3 – Analytical results of groundwater samples.

Muestra	pH	Cond Campo	Balance	∑Cations [meq]	∑Anions [meq]	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Na [mg/L]	K [mg/L]	HCO ₃ [mg/L]	CO ₃ [mg/L]	Cl [mg/L]	SO ₄ [mg/L]	NO ₃ [mg/L]
M4	7.53	735	7%	6.746	5.828	66.737	13.630	49.946	4.750	354.2		0.362	0.331	0.364
M5	5.96	47	9%	0.757	0.906	8.313	1.115	4.034	2.872	20.1	17.1	0.119	0.123	0.016
M6	6.44	312	7%	4.890	4.242	57.495	13.284	19.262	3.517	257.2		0.574	0.208	0.384
M8	7.20	914	8%	13.175	11.270	161.782	41.864	35.884	3.778	646.2	18.2	1.342	0.857	1.049
M9	7.14	700	6%	9.628	8.496	80.961	14.830	85.078	26.062	493.4	11.4	0.283	0.608	0.526
M10	7.62	890	7%	11.532	10.101	3.463	9.250	233.510	17.233	549.0	28.8	2.145	3.645	0.394
M11	7.89	350	7%	6.384	5.512	68.420	26.168	16.764	3.419	312.7	11.4	0.120	0.079	0.073
M12	8.21	380	7%	7.120	6.169	66.270	22.472	43.621	2.598	340.5	17.1	0.352	0.171	0.195
M14	6.82	360	5%	6.127	5.514	59.417	5.392	58.502	6.770	298.8	17.1	0.432	0.167	1.970
M15	8.34	540	8%	11.670	9.934	15.239	3.498	242.301	3.217	556.0	22.8	1.132	0.976	0.412

TABLA 4 – Resultados de analíticos de ^{18}O y ^2H de muestras del área de estudio.TABLE 4 – ^{18}O and ^2H analytical results of the samples from the study area.

Muestra	N° Laboratorio	Fecha	Punto de toma	X	Y	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	d-exc
M4	5525	10/3/2021		591156	6486944	-32.8	-5.62	12.16
M5	5526	10/3/2021		592780	6488299	-31.3	-5.39	11.82
M6	5527	10/3/2021		594432	6491259	-29.8	-4.91	9.48
M7	5528	10/3/2021		593452	6472036	-32.7	-5.29	9.62
M8	5529	10/3/2021		599646	6489245	-30.1	-4.94	9.42
M9	5530	10/3/2021		601367	6485638	-31	-5.02	9.16
M10	5531	10/3/2021		596871	6491206	-35.4	-5.42	7.96
M11	5532	10/3/2021		605148	6499662	-28	-5	12.00
M12	5533	10/3/2021		604275	6498837	-30.1	-5.73	15.74
M14	5535	10/3/2021		600920	6492705	-32.9	-6.18	16.54
M15	5536	10/3/2021		596584	6492934	-38.8	-6.42	12.56
M17	5538	10/3/2021		588404	6494682	-32.5	-5.78	13.74
M19	5540	10/3/2021		589892	6492490	-33.6	-6.03	14.64
M20	5541	10/3/2021		588659	6491256	-31.5	-5.77	14.66
M23	5544	10/3/2021		577923	6478840	-28.6	-5.2	13.00
M24	5545	10/3/2021		597928	6484500	-31	-5.56	13.48
M13	5534	10/3/2021	A° Tres Cruces	604166	6497104	-32.3	-5.47	11.46
M18	5539	10/3/2021	A° Tacuarembó Ch. (arriba)	586544	6498344	-38.3	-5.89	8.82
M21	5542	10/3/2021	A° Tacuarembó Ch. (abajo)	600171	6489742	-39.5	-6.36	11.38
M22	5543	10/3/2021	A° Jabonería	578076	6479046	-22.7	-3.67	6.66
M25	5546	10/3/2021	A° Tranqueras	596502	6482243	-25.9	-4.54	10.42
RC30	6245	7/2/2022	Arroyo Tacuarembó Chico	625149	6462577	-13.6	-2.06	2.88
RC31	6246	7/2/2022	Tacuarembó Grande	628261	6489352	-17.7	-3.17	7.66
RC32	6247	7/2/2022	Arroyo Tres Cruces	616572	6489001	-17	-3.03	7.24
RC33	6248	7/2/2022	Arroyo Tacuarembó Chico	581089	6500255	-21.8	-3.7	7.80
RC34	6249	7/2/2022	Arroyo de la Trinidad	603686	6507311	-27.4	-5.05	13.00
RC35	6250	8/2/2022	Arroyo Tres Cruces	587890	6481245	-16.8	-3.36	10.08
RC36	6251	8/2/2022	Arroyo Sauce de Batoví	592875	6469272	-14.4	-2.86	8.48
M16	5537	10/3/2021	Lago Iporá	598191	6495828	1.4	1.24	-8.52

agua superficial y de $-5.52 \pm 0.45\%$ para subterránea, no obstante, en tramos de los cursos superficiales los valores de ^{18}O son similares a las de las subterráneas. Esto se puede ver en los tramos donde la descarga del agua subterránea se da a los cursos superficiales, a modo de ejemplo las muestras de los Arroyos Tacuarembó, Tres Cruces y Tranqueras, son similares a las subterráneas, diferenciándose tanto en las nacientes como aguas abajo cuando éste ya no se desarrolla sobre los sedimentos de la formación Tacuarembó.

Estos resultados nos han confirmado la interrelación existente entre el agua subterránea y superficial, cuando los cursos se desarrollan sobre los sedimentos que conforman el acuífero, lo que refuerza la interpretación de las direcciones del flujo subterráneo y por ende que cualquier repercusión en la calidad del agua subterránea puede estar afectando la calidad del agua superficial, de la cual se abastece la ciudad de Tacuarembó.

5.4 Modelo conceptual de circulación de las aguas

La construcción del modelo conceptual del funcionamiento hidráulico del SAG en el área, está basado en el comportamiento del flujo de agua subterránea, complementada con la evolución hidroquímica e isotópica, conjuntamente al conocimiento geológico (Figura 12).

Este modelo hidrogeológico conceptual muestra que el acuífero está compuesto esencialmente por una sucesión de estratos arenosos finos a medios, con subordinados bancos de pelitas y pelitas arenosas, de origen continental (fluvial y eólico), que a pesar de tener elementos estructurales que afectan muy parcialmente al mismo, están en continuidad física posibilitando la circulación de agua en toda su extensión.

Los límites hidroestratigráficos definidos sobre la base de elementos geológicos reconocidos en el área de estudio muestran que el SAG aflora

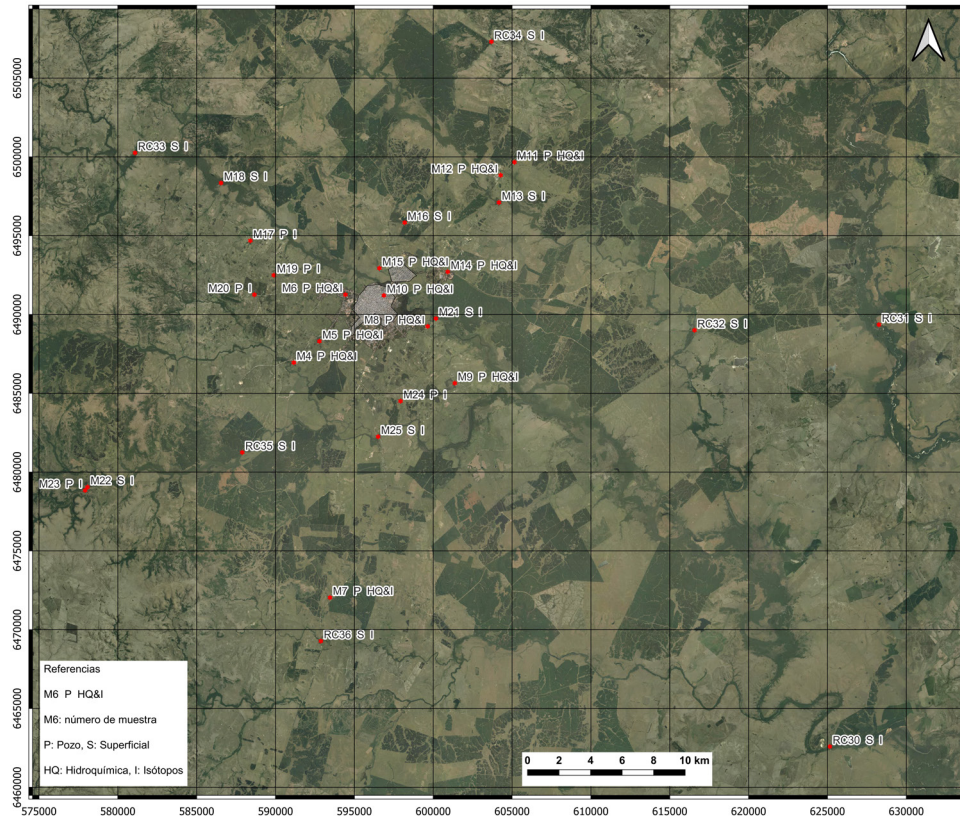


FIGURA 9 – Ubicación de muestras de hidroquímica e isótopos.

FIGURE 9 – Location of hydrochemistry and isotope samples.

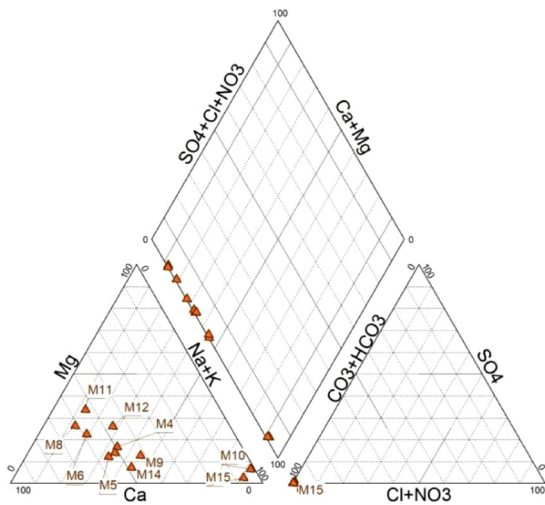


FIGURA 10 – Diagrama de Piper.

FIGURE 10 – Piper diagram.

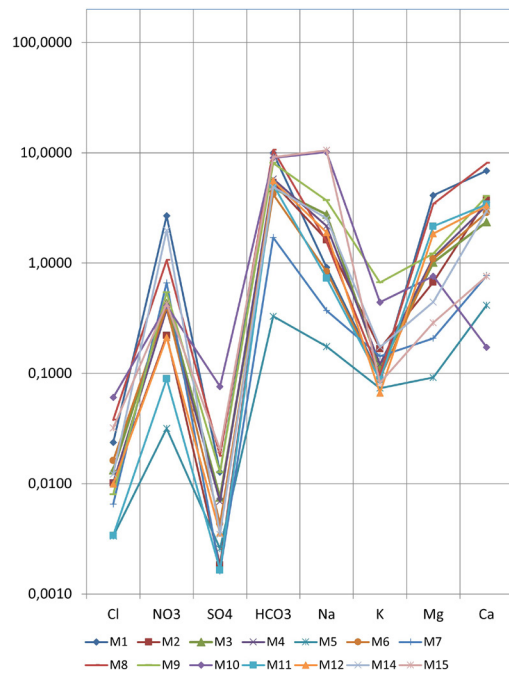


FIGURA 11 – Diagrama de Schoeller.

FIGURE 11 – Schoeller diagram.

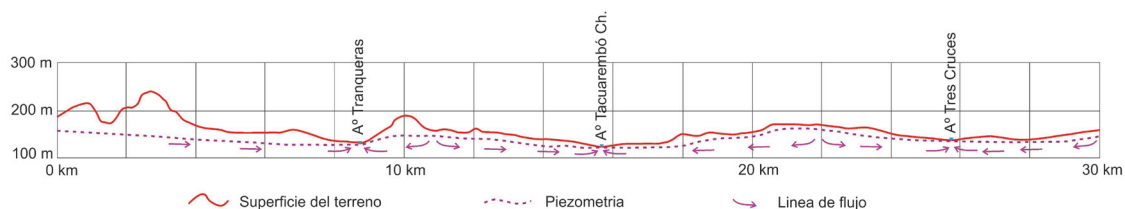


FIGURA 12 – Modelo 2D del funcionamiento hidrogeológico conceptual del SAG en el área de estudio.

FIGURE 12 – 2D model of the conceptual hydrogeologic functioning of the SAG in the study area.

en casi toda el área de estudio y se apoya siempre sobre la Formación Buena Vista. La contribución de la Formación Tacuarembó como acuífero es significativamente mayor a la Formación Rivera, esta última con un desarrollo en el área muy poco expresivo y espesores muy delgados.

El acuífero es libre a semilibre en la mayor parte del área, pudiéndose considerar como confinado en las zonas en que está cubierto por las rocas basálticas de la Formación Arapey. El espesor del SAG en el área de estudio está en el orden de 80 a 90 m.

La piezometría indica un flujo del agua subterránea descargando a los cursos superficiales, principalmente, de Norte a Sur, los arroyos Tres Cruces, Tacuarembó Chico y Tranqueras, los que a su vez muestran un fuerte control estructural sobre su drenaje. Las divisorias de agua son casi coincidentes con los partes aguas superficiales.

Los gradientes tienen una media de 0.011 ± 0.005 con un máximo de 0.022 y mínimo de 0.004.

La profundidad promedio de pozo es de 54 ± 30 m y caudales de 3.31 ± 2.83 m³/h.

El funcionamiento del sistema se confirma además por el comportamiento del contenido de ¹⁸O, tanto en agua subterránea como en superficial.

5.5 Vulnerabilidad GOD

La aplicación de los criterios se basó en la piezometría que se obtuvo en la realización del mapa hidrogeológico, el grado de confinamiento se basó en la existencia o no de una capa de rocas basálticas por encima de las areniscas de la Formación Tacuarembó y la zona de transición o no saturada se optó por realizar una clasificación según la naturaleza litológica y en la zona de descarga del acuífero. Por ese motivo, se valoró que los materiales suprayacentes a las areniscas eran más arcillo limosos, esto debido a que era la única forma de simular según la aplicación de este modelo que, al tener un flujo ascendente, no era

una zona de posible ingreso de contaminantes al acuífero.

En la figura 13 se muestra el resultado obtenido, del cual se desprende que del total del área el 56% de la misma posee vulnerabilidad media, el 24% alta y 20% baja.

5.6 Vulnerabilidad DRASTIC

Como señalado, DRASTIC contempla siete factores a tener en cuenta para la solución y, a su vez, cada uno de ellos presenta una distribución espacial que no es homogénea en toda el área. A modo de ejemplo, la recarga varía según la zona donde se aplica, no siendo la misma en la zona confinada que en la libre. Sucede lo mismo con la conductividad hidráulica, la que fue ponderada con valores de acuerdo con la zona, de forma similar sucede con la topografía y el tipo de suelo. Existen factores tal como la litología del acuífero que fue considerada uniforme para toda el área.

La aplicación del modelo para la determinación de la vulnerabilidad DRASTIC se muestra en la figura 14. Los resultados alcanzados muestran que el 76% del área presenta vulnerabilidad moderada, el 17% Alta y el 7% Baja, siendo la muy baja y alta despreciables.

6 DISCUSIÓN

Los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas evaluadas a través de DRASTIC y GOD en la ciudad de Tacuarembó y área de influencia presentan variaciones significativas en términos de vulnerabilidad. Estos resultados dependen fundamentalmente de la cantidad de parámetros que utilizan cada uno de estos métodos en la determinación de la vulnerabilidad. En la tabla 5 se presenta las diferencias de áreas según la vulnerabilidad determinada a partir de cada método.

DRASTIC resulta más restrictivo y realiza una mejor clasificación, aspecto que surge de la

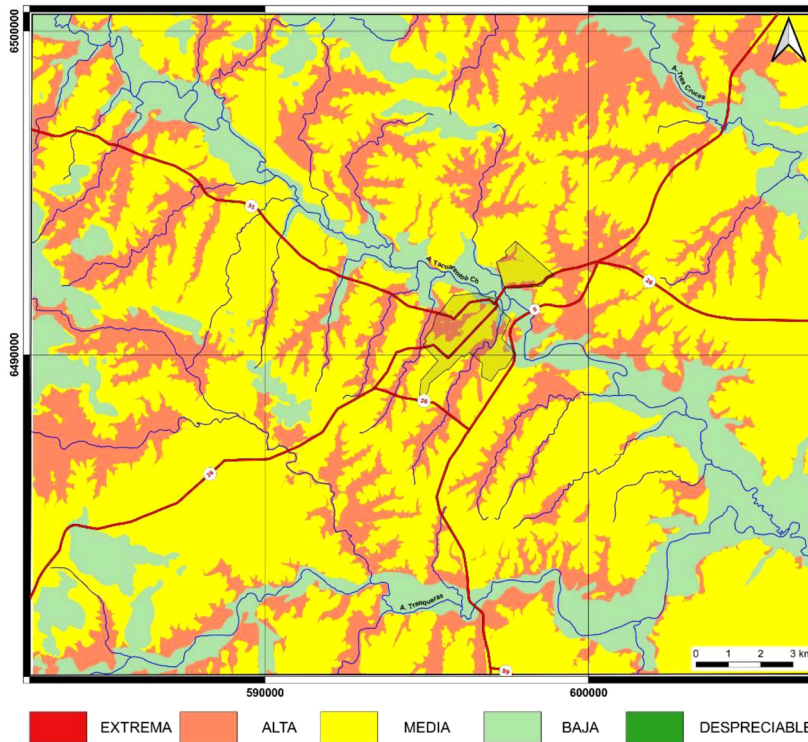


FIGURA 13 – Mapa de vulnerabilidad GOD de la ciudad de Tacuarembó y alrededores.

FIGURE 13 – GOD vulnerability map of the city of Tacuarembó and surrounding area.

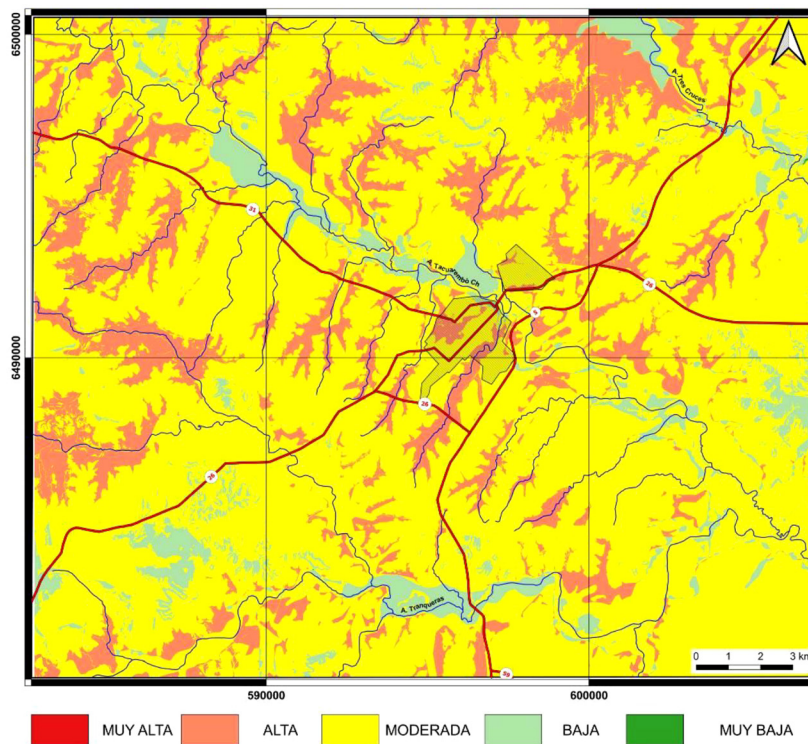


FIGURA 14 – Mapa de vulnerabilidad DRASTIC de la ciudad de Tacuarembó y alrededores.

FIGURE 14 – DRASTIC vulnerability Map of the city of Tacuarembó and surroundings.

TABLA 5 – Comparación de resultados GOD vs. DRASTIC.

TABLE 5 – Comparison of GOD vs. DRASTIC results.

<i>Vulnerabilidad</i>		<i>GOD</i>	<i>DRASTIC</i>
<i>GOD</i>	<i>DRASTIC</i>	%	%
Despreciable	Muy baja	0%	0%
Baja	Baja	20%	7%
Media	Moderada	56%	76%
Alta	Alta	24%	17%
Extrema	Muy alta	0%	0%

comparación entre los mapas de las figuras 13 y 14. De esta forma, DRASTIC resulta más exigente ya que plantea que el 93% del área se encuentra entre vulnerabilidad media a alta, mientras que GOD estima ese comportamiento en un área de 80%. Esto se debe principalmente a que DRASTIC toma un conjunto mayor de información para la determinación de la vulnerabilidad, lo que también lo hace, en algunos casos, un modelo más complejo de aplicar ante la necesidad de un conjunto de datos e información mayor que muchas veces no está disponible o se lo tiene a escalas incompatibles para la aplicación del método con cierta rigurosidad. Cabe señalar que GOD no incluye un factor tan importante como la recarga, lo que tiene un peso cuantitativo significativo cuando es comparado con los resultados arrojados por DRASTIC.

Es de destacar que ambas metodologías son sensibles en función de los valores adoptados para representar los distintos factores que intervienen en la fórmula de cálculo. A modo de ejemplo, un factor muy ponderado es la recarga, factor que tiene un factor de multiplicación 4, y el cual puede variar a lo largo del tiempo (anual), y puede dar variaciones en la determinación de la vulnerabilidad. Como ejemplo, debe tenerse en cuenta que, para un período de 20 años en el área, la estación meteorológica del INIA-GRAS registró los siguientes valores anuales acumulados de precipitación: $PP_{MEDI A} = 1547 \pm 461$ mm/año, a efectos de evaluar la recarga para la aplicación del método se utilizó el promedio de lluvias de los 20 años, pero como se observa la misma tiene un sesgo de 461 mm.

Estas variaciones en la recarga también pueden hacer variar el almacenamiento y por lo tanto variaciones en el nivel estático del acuífero y por lo tanto variar el espesor saturado y profundidad del agua, fundamentalmente en la zona libre del mismo. Estas variaciones se generan a lo largo del año, ya que dependen de la lluvia diaria. En nuestro caso hemos considerado valores medios

de profundidad el agua y zona no saturada, pero al tomar valores que varían con el tiempo afectarían parámetros utilizados tanto en GOD como en DRASTIC.

En virtud de lo expresado anteriormente, la determinación de la vulnerabilidad del acuífero evaluada según estas dos metodologías responde a una aproximación de esta con las condiciones utilizadas para los cálculos las cuales reflejan la toma de decisiones que fueron asumidas para los cálculos.

Es importante destacar que la utilización de un método u otro también debe de tener en cuenta la escala de trabajo, cuando se trabaja en escala regional (mayor a 1:50000) por lo general es mejor el uso de GOD ya que el número de parámetros a utilizar es menor y los resultados no son muy disimiles de los obtenidos por el método DRASTIC, cuando trabajamos a escala local, más restringida (menor a 1/50000) es preferible la utilización del método DRASTIC que permite una mejor definición de las área de vulnerabilidad.

Otro elemento importante de mencionar es que en ambos métodos se presenta la profundidad del acceso al agua como un factor relevante en la determinación de la vulnerabilidad, pero no se tiene en cuenta el modelo conceptual del acuífero. En ese sentido, tal como señalado, en las zonas próximas a los principales cursos de agua superficial, el agua subterránea está muy próxima a la superficie, pero esto se debe a que es área de descarga de esta. Por lo tanto, presenta una presión positiva, flujo ascendente, por lo que el posible contaminante no podría ingresar al acuífero. Para subsanar este aspecto, en ambos métodos se utilizaron ponderaciones en lo que se correspondería a la zona no saturada con valores menores a los que se les debería asignar.

7 CONCLUSIONES

En el área de la ciudad de Tacuarembó y alrededores, el Sistema Acuífero Guaraní exhibe una vulnerabilidad media o moderada (según el método aplicado), las que pueden ser tomadas de una forma general como equivalentes, por lo que toda actividad antropogénica que se realice debe tener presente estas características del acuífero.

Las metodologías aplicadas para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero en el área de trabajo (GOD y DRASTIC) si bien son ampliamente difundidas, cabe destacar que la aplicación de cada uno de estos métodos está

supeditada a la información de base que se disponga para su uso, la adquisición de nuevos datos y de la escala de la evaluación de la vulnerabilidad. Ambos métodos presentan resultados que varían sustancialmente en el tipo de riesgo que presentaría el acuífero, lo cual está relacionado directamente con la cantidad de parámetros utilizados por cada uno.

A efectos de la aplicación de los métodos de evaluación de la vulnerabilidad fue necesario conceptualizar un modelo de funcionamiento del sistema acuífero en la región estudiada. Este modelo muestra que, en el área de afloramiento, la descarga del acuífero se produce hacia la red de drenaje donde los principales factores resultan del control del relieve, así como los elementos morfoestructurales. Este conjunto es el que prima y define una componente general de dirección de flujo subterráneo hacia el Este. Esta característica del modelo conceptual hidrogeológico se apoya en los resultados e interpretación de la piezometría, así como en la aplicación de isótopos naturales estables.

La propuesta de una revisión del Plan de Ordenamiento Territorial del área debería de tener presente este estudio, para determinar los usos del territorio en función de la posible afectación del acuífero con las actividades que se desarrollen en superficie.

8 AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a las instituciones públicas DINAMIGE, DINAGUA, OSE y a la empresa perforadora GEO AGUAS SUBTERRÁNEAS LTDA, por el acceso a sus bases de datos y litoteca. Al Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (Pecibica Geociencias) y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII_FMV_1_2019_1_155736) por los apoyos recibidos. A los revisores anónimos que contribuyeron a mejorar la calidad del texto.


9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Oklahoma, EPA/600/2-87/035.
- ARAÚJO, L.M.; FRANÇA A.B.; POTTER P.E. 1995. *Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai: Mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó*. UFPR-Petrobras, Curitiba, Texto Explicativo, 16 p.
- BOSSI, J. 1966. *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo, 469 p.
- BOSSI, J.; FERRANDO, L. 2001. *Carta geológica del Uruguay, escala 1:500.000*. Edición Geoditores SRL, Montevideo (CD-ROM).
- BOSSI, J.; FERRANDO, L.; FERNÁNDEZ, A.; ELIZALDE, G.; MORALES, H.; LEDESMA, J.; CARBALLO, E.; MEDINA, E.; FORD, I.; MONTAÑA, J. 1975. *Carta geológica del Uruguay, escala 1/1.000.000*. Dir. Suelos y Fertilizantes, MAP, Montevideo.
- BUQUET, L. 1943. *Orientaciones generales para la investigación de aguas subterráneas en la República*. Instituto Geológico del Uruguay, Sección Hidrología y Servicio de Perforaciones, Memoria n °1, Imprenta Nacional, Montevideo, 34 p.
- CARRIÓN, R. 1991. *Hidrogeología en torno a la ciudad de Tacuarembó*. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Trabajo de grado, Licenciatura en Geología, 45 p.
- CARRIÓN, R. 2023. *Determinación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó*. Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Tesis de Maestría, 96 p.
- COLLAZO, M.P. 2006. *Investigación hidrogeológica de Acuífero Guaraní en el área aflorante de los departamentos de Rivera y Tacuarembó, Uruguay*. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas


- y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 158 p.
- DOREIS, A.; SCHERER, C.M.S.; AMARANTE, F.B.; ROSSETTI, M.M.M.; KIFUMBI, C.; SOUZA, E.G.; FERRONATTO, J.P.F.; OWEN, A. 2019. Sedimentology of the proximal portion of a large-scale, Upper Jurassic fluvial-aeolian system in Paraná Basin, southwestern Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 95: 102248. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102248>
- FERRANDO, L.; ANDREIS, R.R.; MONTAÑA, J.R. 1987. Estratigrafía del Triásico – Jurásico uruguayo en la Cuenca de Paraná. In: SBG, SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, *Atas*, 1: 373–378.
- FOSTER, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, International conference, *Proceeding*.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. 1988. *Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data*. CEPIS, Lima, 86 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. 2002. *Protección de la Calidad del Agua Subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial, Washington, DC, 115 p. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13843>
- GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R.; NOGUEIRA PRESSINOTTI, M.M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3): 249–265.
- GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; SANTAROSA, L.; MANGANELLI, A.; SAMANIEGO, L.; CARRIÓN, R. 2022. Áreas de afloramiento e áreas de recarga do Sistema Aquífero Guaraní são as mesmas? O paradigma do território uruguaio. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 22, São Paulo, *Anais*, 2 p.
- GILBOA, Y.; MERO, F.; MARIANO, I.B. 1976. The Botucatu Aquifer of South América: Model of an Untaped Continental Aquifer. *Journal of Hydrology*, 29: 165–179. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(76\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(76)90012-3)
- HEINZEN, W.; CARRIÓN, R.; MASSA E.; PENA, S.; STAPFF, M. 1987. *Mapa Hidrogeológico del Uruguay y Memoria Explicativa, escala 1: 2.000.000*. Dirección Nacional de Minería y Geología, Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay. <http://www.dinamige.gub.uy/ch25.htm>.
- HEINZEN, W.; CARRIÓN, R.; MASSA, E.; PENA, S.; STAPFF, M. 2003. *Mapa Hidrogeológico del Uruguay*. Dirección Nacional de Minería y Geología, Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay. <http://www.dinamige.gub.uy/ch25.htm>.
- IDE – INFRAESTRUCTURA DE DATOS ESPACIALES. 2022. *Fotomosaicos y Modelo Digital del Terreno*. <https://www.gub.uy/infraestructura-datos-espaciales/>
- INE – INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2011. *Censo 2011*. Instituto Nacional de Estadísticas, República Oriental del Uruguay. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/>
- INIA–GRAS. 2022. *Base de datos agroclimáticos y balance hídrico*. <http://www.inia.uy/gras>
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1980. *Reconhecimento hidrogeológico do aquífero Tacuarembó, entre Paysandú e Bella Union, República Oriental del Uruguay*. IPT, São Paulo (Relatório nº 14.364).
- LEBAC – LABORATÓRIO DE ESTUDOS DE BACIAS. 2008. *Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Aquífero Guaraní*. LEBAC/UNESP, Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní, Consórcio Guaraní, Rio Claro, 172 p.
- MANGANELLI, A.; GASTMANS, D.; SANTAROSA, L.; VEROSLAVSKY,

- G.; AUBET, N.; SAMANIEGO, L.; CARRIÓN, R.; POCHINTESTA, L.; PEDRO MALTESE, M.A.; ARTEAGA, J. 2021. A review of regional groundwater flow model in Guarani Aquifer System outcrop region in Uruguay: consequences for integrated surface and groundwater management. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE "TRANSBOUNDARY AQUIFERS. CHALLENGES AND THE WAY FORWARD"*, 2, Paris, ISARM UNESCO, *Book of abstracts*.
- MGAP-DGRN – MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA - DIRECCIÓN GENERAL DE RECURSOS NATURALES. 2002. *Carta de suelos del departamento de Tacuarembó*. https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/tacuarembó_suelos_100000.zip
- MIDES – MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL. 2020. *Reportes departamentales: Tacuarembó*. Dirección Nacional de Evaluación y Monitoreo. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-desarrollo-social/sites/ministerio-desarrollo-social/files/documentos/publicaciones/Informe%20Tacuaremb%C3%B3.pdf>
- MONTAÑO, M. 2005. *Estudio hidrogeológico del sistema acuífero guaraní en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó*. Universidad de la República, Montevideo, Trabajo Final de grado Licenciatura en Geología.
- MONTAÑO, J.; CARRIÓN, R. 1990. Optimización de la explotación del Sistema Acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó – Buena Vista. *Águas Subterrâneas (Suplemento) - Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*: 180-189. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24541>
- MONTAÑO, J.; TUJCHNEIDER, O.; AUGE, M.; FILI, M.; PARIS, M.; D'ELÍA, M.; PÉREZ, M.; NAGY, M.I.; COLLAZO, P.; DECOUD, P. 1998. *Acuíferos regionales en América Latina. SAG. Capítulo argentino – uruguayo*, Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 217 p.
- PANARIO, D. 1988. *Geomorfología del Uruguay, Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo*. Departamento Publicaciones - Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, 32 p.
- POCHINTESTA, L. 2018. *Importancia del conocimiento del medio físico en el ordenamiento territorial: estudio de caso Ciudad de Tacuarembó y alrededores*. Facultad de Ciencias, Trabajo de grado, Licenciatura en Geología, Uruguay, 164 p. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/21415?mode=full>
- PRECIOZZI, F.; SPOTURNO, J.; HEINZEN, W.; ROSSI, P. 1985. *Carta geológica del Uruguay, 1:500.000*. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo, 90 p.
- STRUCKMEIER, W.F.; MARGAT, J. 1995. *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend*. International Association of Hydrogeologists, Hannover, International contributions to hydrogeology, v. 17, 177 p.
- TAHAL. 1986. *Proyecto agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos*. Tahal Consulting Engineers, VERNON - ROU, 8 tomos.
- TECHERA, J.; MASSA, E.; IZQUIERDO, D.; PÉREZ, S. 2017. *Mapa del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay*. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo. Disponible en <http://www.dinamige.gub.uy>.
- VEROSLAVSKY, G.; MANGANELLI, A. 2018. Zoning of the Guarani Aquifer System in Uruguay: a suggested guide for its environmental management and protection. *Aqua-LAC*, 10(2): 61-80.
- VEROSLAVSKY, G.; SOTO, M.; MESA, V.; MANGANELLI, A. 2024. Geología del Sistema Acuífero Guaraní en el área de afloramiento: Formaciones Tacuarembó y Rivera (Cuenca Norte, Uruguay). *Revista la Asociación Geológica Argentina*, 81(2): en progreso. <https://revista.geologica.org/raga/article/view/1741/1712>

Direcciones de los autores:

Roberto Carrión* ( 0000-0003-0453-757X) – PEDECIBA Geociencias, Iguá 4225, Malvín Norte, CP 11400, Montevideo, Departamento de Montevideo, Uruguay. *E-mail:* roberto.carrion@pedeciba.edu.uy

Didier Gastmans ( 0000-0002-1340-3373) – Centro de Estudos Ambientais - CEA, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Av. 24 A, 1515, Bela Vista, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil. *E-mail:* didier.gastmans@unesp.br

Gerardo Veroslavsky ( 0000-0002-9121-4666) – Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias – UDELAR, PEDECIBA Geociencias, Iguá 4225, Malvín Norte, CP11400 Montevideo, Departamento de Montevideo, Uruguay. *E-mail:* gerardo@fcien.edu.uy

*Autor correspondiente

Manuscrito presentado el 23 de abril de 2024, aceptado el 15 de julio de 2024.

