



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



PEDECIBA
Geociencias

Facultad de Ciencias, Universidad de la República

Instituto de Ciencias Geológicas

PEDECIBA Geociencias

Tesis de Maestría

**DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ (SAG) EN LOS
ALREDEDORES DE LA CIUDAD DE TACUAREMBÓ**

Autor: ROBERTO ANDRÉS CARRIÓN OLIVERI

Orientador: DIDIER GASTMANS

Coorientador: GERARDO VEROSLAVSKY

Montevideo, Uruguay

2023

Tabla de contenido

Resumen.....	IV
Abstract.....	V
Dedicatoria.....	VI
Agradecimientos.....	VII
Figuras y tablas.....	VIII
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	4
2.1. Objetivo general.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. Contexto físico, social y económico.....	5
4. Antecedentes.....	12
5. Metodología utilizada.....	16
5.1. Base de datos de perforaciones.....	18
5.2. Piezometría.....	19
5.3. Hidroquímica e isótopos.....	21
5.4. Métodos para evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero.....	27
5.4.1. Método GOD.....	28
5.4.2. Método DRASTIC.....	30
5.5. Riesgo de contaminación.....	37
6. Resultados.....	42
6.1. Geología.....	42
6.2. Piezometría.....	45
6.3. Hidroquímica.....	46
6.3.1. Elementos mayores.....	46
6.3.2. Isótopos estables.....	49
6.4. Mapa hidrogeológico.....	51
6.5. Vulnerabilidad del acuífero.....	53

6.5.1. Método GOD.....	53
6.5.2. Método DRASTIC	57
6.6. Riego de contaminación del acuífero	65
7. Discusión	69
8. Conclusiones	72
9. Bibliografía	74
10. Anexo Mapas	78

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, así como, debería ser considerado en los planes de ordenamiento del territorio en esa ciudad, de forma tal de cuidar el recurso. Se aplicaron dos métodos para la determinación de la vulnerabilidad, GOD y DRASTIC mientras que para evaluar el riesgo de contaminación se tomó en cuenta el uso del suelo para la evaluación del riesgo difuso y puntos determinados para el riesgo puntual. La aplicación de los métodos GOD y DRASTIC mostraron diferencias en las determinaciones de la vulnerabilidad del acuífero, 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%. Por último, en relación al riesgo de contaminación, la metodología aplicada nos indica que el 57% del área presenta riesgo *medio*, el 26% riesgo alto o *muy alto* y el resto, riesgo *bajo a muy bajo*.

Palabras clave: vulnerabilidad, hidrogeología, contaminación, Sistema Acuífero Guaraní, Tacuarembó, Uruguay.

Abstract

The sustainability of water resources, whether surface or subsurface, is of paramount importance. This study focuses on the protection of the Guarani Aquifer System (GAS) in the Tacuarembó region, Uruguay. It evaluates the intrinsic vulnerability and contamination risk of the aquifer, providing essential data for its usage planning and territorial management to safeguard this vital resource.

To assess aquifer vulnerability, two methodologies were employed: GOD and DRASTIC. Additionally, land use was considered to evaluate diffuse and specific contamination risks. The application of the GOD and DRASTIC methods revealed variations in vulnerability assessment, with GOD using fewer parameters than DRASTIC. The choice of method primarily depends on the data available for the study area. Notably, GOD is more restrictive, classifying 24.3% of the area under high vulnerability, whereas DRASTIC considers this proportion nearly negligible. In terms of low vulnerability areas, DRASTIC is slightly more restrictive, covering 10% more area than GOD.

Key words: vulnerability, hydrogeology, contamination, Guarani Aquifer Systems, Tacuarembó, Uruguay

Dedicatoria

A mis ex compañeros de la Dirección Nacional de Minería y Geología, los que están y los no ya, que fueron los que me impulsaron al estudio de la geología y fundamentalmente de la hidrogeología.

A mi familia que me apoyó en todo momento para este trabajo y en toda mi carrera de geólogo.

El agua es la fuerza que mueve a la naturaleza

Leonardo Da Vinci

Agradecimientos

El autor quiere 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 (Pediciba Geociencias) y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII_FMV_1_2019_1_155736) por los apoyos recibidos.

Figuras y Tablas

Figura 1. Localización del Sistema Acuífero Guaraní y los rasgos geológicos fundamentales de Uruguay. El área de estudio se señala con el rectángulo

Figura 2. Ubicación del área de estudio, elaborada a partir de las cartas del Servicio Geográfico Militar (escala 1:50.000)

Figura 3. Mapa hipsométrico del área de estudio elaborado a partir del MDT de la IDE-AGESIC

Figura 4. Histograma de clasificación de alturas

Figura 5. Contexto geológico regional del área de estudio (tomado del proyecto ANNI - FMV_1_2019_1_155736: Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en área de afloramiento).

Figura 6. Promedios mensuales para el período 2001-2021 de precipitación acumulada, efectiva y evaporación Penman

Figura 7. Promedios mensuales para el período 2001-2021 de temperaturas, máxima, media y mínima

Figura 8. Plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Tacuarembó 2012 (Plan Local de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible de la Micro Región de la Ciudad de Tacuarembó)

Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología empleada en este estudio

Figura 10. Actividades de descripción litológica realizado en la litoteca de DINAMIGE (izquierda) y 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

Figura 11. Distribución de perforaciones utilizadas para la confección de la piezometría del piloto (puntos con cotas del nivel estático)

Figura 12. Toma de muestra de perforación en los alrededores de Valle Edén (derecha) y toma de muestra de agua superficial

Figura 13. Equipos que fueron utilizados para la determinación por titulación (izquierda) y equipo de Cromatografía Iónica (derecha) del Departamento del Agua, Centro Universitario de Norte, Salto, UDELAR

- Figura 14. Equipo de espectroscopia Laser del Laboratorio de la UNESP en el Campus de Rio Claro, San Pablo donde se realizaron los estudios isotópicos
- Figura 15. Mapa de puntos de muestreo asociados a la Tabla 7
- Figura 16. Parámetros utilizados en el método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Foster et al., 2002)
- Figura 17. Esquema de evaluación del riesgo. (Oliveira, (2016)
- Figura 18. Mapa geológico del piloto Tacuarembó (Carrión y Pochintesta, 2022)
- Figura 19. Corte Geológico NE - SO
- Figura 20. Exposición de la Formación Tacuarembó en desmonte de camino vecinal
- Figura 21. Detalle del mismo afloramiento de la Formación Tacuarembó
- Figura 22. Mapa piezométrico del área
- Figura 23. Diagrama de Piper
- Figura 24. Diagrama de Schoeller
- Figura 25. Diagrama de Stiff
- Figura 26. Diagrama de Wilcox
- Figura 27. Isótopos de aguas de lluvia de las estaciones Montevideo y Porto Alegre
- Figura 28. Isótopos de aguas subterráneas y superficiales
- Figura 29. Mapa hidrogeológico
- Figura 30. Modelo hidrogeológico conceptual
- Figura 31. Mapa de confinamiento, según criterio GOD
- Figura 32. Mapa de zona no saturada, criterio GOD
- Figura 33. Mapa de profundidad del agua, según criterio GOD
- Figura 34. Mapa de vulnerabilidad según GOD
- Figura 35. Mapa de profundidad del agua, criterio DRASTIC
- Figura 36. Mapa de recarga neta, criterio DRASTIC
- Figura N° 37. Mapa de litología del acuífero, según criterio DRASTIC
- Figura 38. Mapa de suelos, criterio DRASTIC

Figura 39. Mapa de topografía, según criterio DRASTIC

Figura 40. Mapa de zona no saturada, clasificado según criterio DRASTIC

Figura 41. Mapa de conductividad hidráulica

Figura 42. Mapa de vulnerabilidad del acuífero, según criterio DRASTIC

Figura 43. Mapa de usos del suelo

Figura 44. Mapa fuentes puntuales de contaminación

Figura 45. Mapa de riesgo de contaminación

Figura 46. Variación de la clasificación DRASTIC según la recarga

Tabla 1. Uso del suelo según MGAP, 2021

Tabla 2. Número de habitantes y hogares según censo 2011 (INE, 2011)

Tabla 3. Exportaciones, montos y destinos según Uruguay XXI - 2021

Tabla 4. Listado de puntos con muestra de agua, la ubicación geográfica luce en la Figura 17.

Tabla 5. Puntos con ensayo de bombeo

Tabla 6. Contaminantes comunes del agua subterránea y fuentes de contaminación asociadas. Foster, S. (2002)

Tabla 7. Clasificación del uso del suelo

Tabla 8. Índice de riesgo de contaminación

Tabla 9. Datos de campo

Tabla 10. Datos de laboratorio

Tabla 11. Resultados de análisis de 18O y 2H

Tabla 12. Área ocupada según vulnerabilidad GOD

Tabla 13. Áreas ocupadas según clasificación DRASTIC

Tabla 14. Área según el riesgo de contaminación

Tabla 15. Comparación de la vulnerabilidad según GOD y DRASTIC

Tabla 16. Variación de la clasificación DRASTIC según la recarga

1. Introducción

Las aguas subterráneas son una reserva estratégica crucial, tanto para el suministro de agua a poblaciones como para la agricultura. En el contexto del cambio climático, con la variabilidad en los patrones de lluvia y la ocurrencia de grandes sequías, la gestión sostenible de estas reservas se vuelve imperativa. Tanto el riesgo de agotamiento como el impacto del uso del suelo sobre las aguas subterráneas, plantean una amenaza para la salud pública global, un desafío que aún no ha sido reconocido (Giménez, 2009). El uso de aguas subterráneas, principalmente para el abastecimiento humano, ha llevado a que los técnicos y profesionales que trabajan en esa área hayan integrado a sus trabajos la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero frente a la posibilidad de ingresos de contaminantes al mismo, con el consiguiente riesgo de contaminación.

Este trabajo presenta un análisis ambiental sobre un área que comprende a la ciudad de Tacuarembó y sus alrededores, región situada en la región centro – norte de Uruguay (Figura 1), la que posee un alta sensibilidad social y ambiental al estar emplazada directamente sobre las unidades constituyentes del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), las que, a su vez, son muy frágiles y susceptibles.

Se presenta un conjunto de resultados hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos sobre el SAG que aportaron para el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del acuífero. Los estudios de vulnerabilidad incluyeron la elaboración de dos mapas a través de metodologías diferentes, a la misma escala de detalle, lo que permitió realizar una comparación entre ambos métodos.

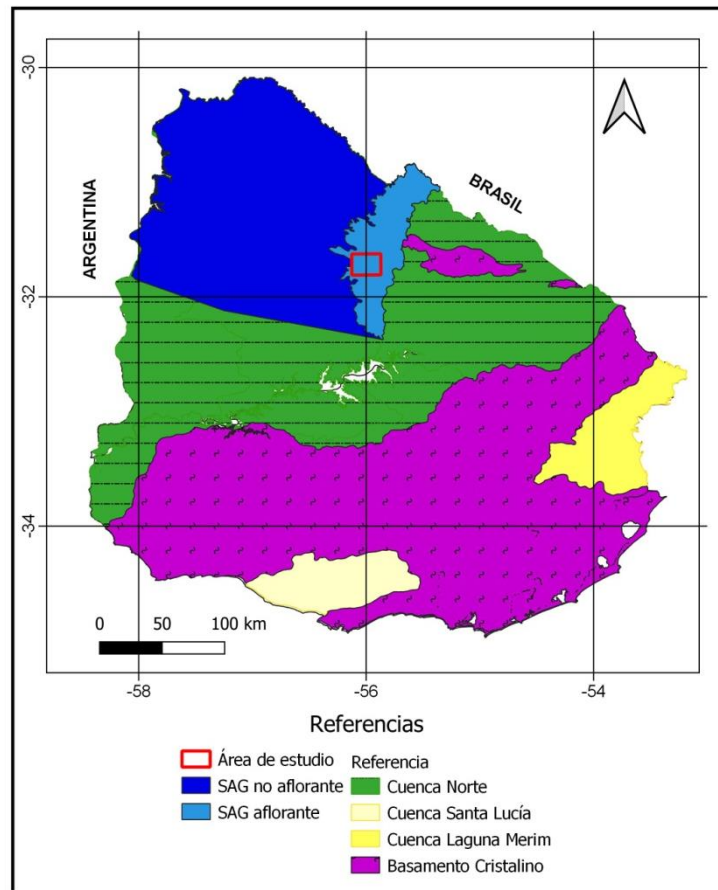


Figura 1. Localización del Sistema Acuífero Guaraní y los rasgos geológicos fundamentales de Uruguay. El área de estudio se señala con el rectángulo.

El término vulnerabilidad se comenzó a utilizar intuitivamente a partir de la década de 1970 en Francia (Albinet y Margat, 1970) y, posteriormente, ha sido más ampliamente utilizado en la década de 1980 (Haertle, 1983; Aller et al., 1987; Foster e Hirata, 1988). Cabe señalar que, la evaluación de la vulnerabilidad se ha realizado aquí a partir de la aplicación de los métodos GOD y DRASTIC. El primero fue desarrollado por el Dr. Ing. Stephen Foster del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) y el Dr. Ricardo Hirata del Departamento de Agua y Energía (DAEE) de San Pablo. El método DRASTIC fue desarrollado por un amplio grupo de trabajo liderado por la hidrogeóloga Dra. Linda Aller de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Por otra parte, cabe señalar que, a partir de la determinación de la vulnerabilidad, se analizó la susceptibilidad al riesgo de contaminación, la que fue evaluada a partir de la propuesta metodológica de Ribeiro (2005). Este plantea la utilización del uso del suelo asociado a

parámetros que utiliza el método DRASTIC para su evaluación, así como también el inventario de industrias, vertedero de residuos domiciliarios, zonas con red de saneamiento y sin la misma, planta de depuración de aguas servidas, estaciones de servicios.

A partir de los datos obtenidos y la información levantada y procesada se han confeccionado dentro de los productos de esta tesis cuatro mapas a escala 1/50000, a saber:

Mapa hidrogeológico

Mapa de vulnerabilidad GOD

Mapa de vulnerabilidad DRASTIC

Mapa de susceptibilidad a la contaminación

Finalmente, cabe destacar que los resultados cartográficos de vulnerabilidad obtenidos sustentan la necesidad de proteger al acuífero, estos muestran su vulnerabilidad ante la contaminación por posibles fuentes introducidas en la superficie y por lo tanto mantenga su sustentabilidad. Varios de los productos hidrogeológicos y ambientales elaborados pretenden también brindar un soporte técnico a considerar por parte de los distintos organismos que hacen a la gestión del recurso, como así también su protección ambiental. En particular, se entiende que son de gran utilidad para el ordenamiento del territorio de la ciudad de Tacuarembó y alrededores, ya que del mismo se pueden extraer y definir zonas de protección en la elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del SAG en el área de la ciudad de Tacuarembó.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Mapa geológico (1/50000).
- ✓ Conceptualización del sistema acuífero y Mapa Hidrogeológico
- ✓ Mapas de Vulnerabilidad GOD y DRASTIC, y comparativo entre ambos métodos.
- ✓ Mapa de Riesgo de Contaminación

3. Contexto físico, social y económico

El área de trabajo tiene como centro la ciudad de Tacuarembó y abarca un área de unos 500 km² (Figura 2).

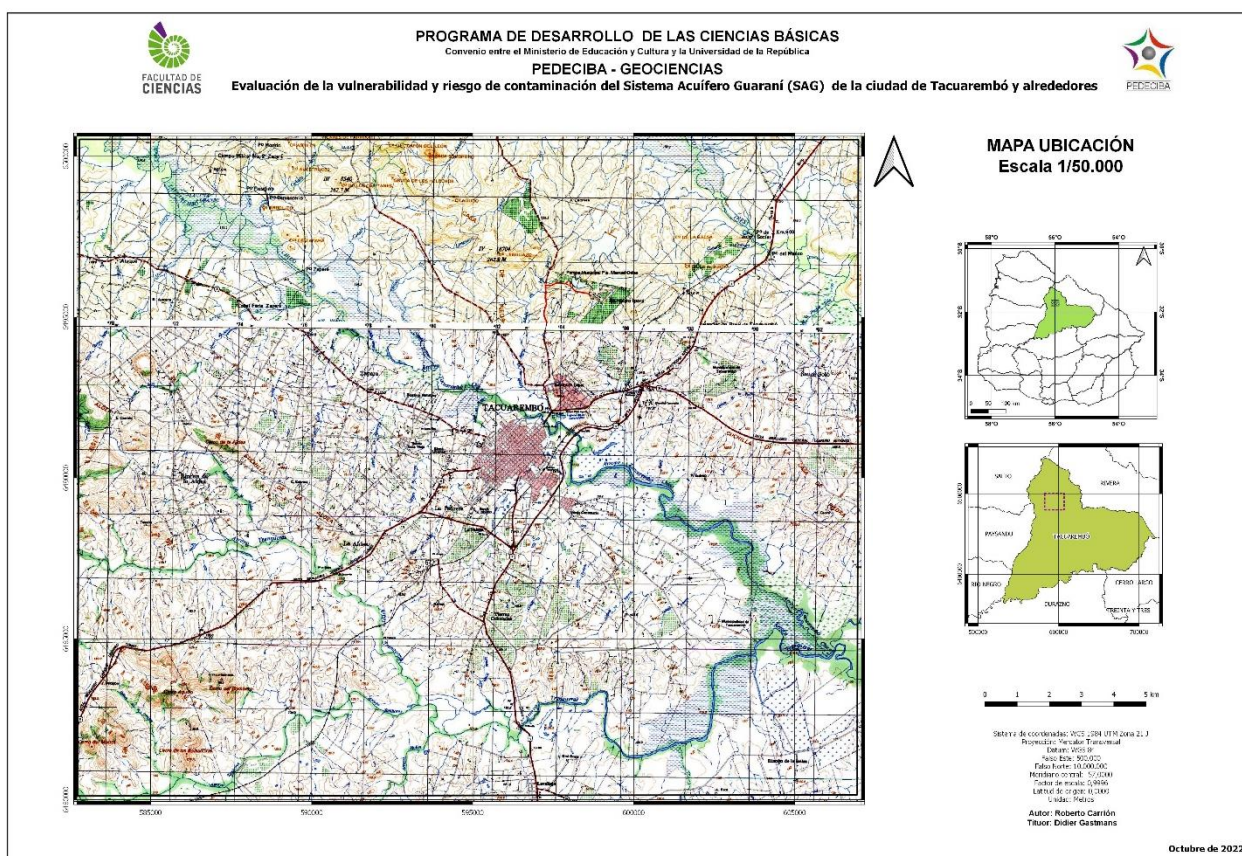


Figura 2. Ubicación del área de estudio, elaborada a partir de las cartas del Servicio Geográfico Militar (escala 1:50.000), (Link al mapa a escala original)

Desde el punto de vista geomorfológico, dada la zonificación propuesta por varios autores para la región situada al Norte del río Negro, el área de estudio se desarrolla casi exclusivamente sobre la denominada “Penillanura Sedimentaria Gondwánica” (Chebataroff (1951-1952) o “Cuenca Sedimentaria del Noroeste (Panario 1986), la que se desarrolla al Oeste de la Cuesta Basáltica y su adyacente Zona de Retroceso de la Cuesta (o escarpa).

Panario, (1988), define la Cuesta Basáltica como uno de los eventos estructurales más importantes en la región NW donde el basculamiento de los derrames le confieren a la región una estructura en cuesta de frente Este. Los derrames recubren los sedimentos de la cuenca Gondwánica mientras que la escarpa en el área de estudio aparece muy

erosionada por corrientes fluviales obsecuentes que corren hacia el Este, muchos controlados por elementos morfoestructurales, y tienen como nivel de base el río Tacuarembó, principal afluente del río Negro.

En la Figura 3, se presenta un mapa de relieve extraído del Modelo Digital del Terreno (MDT) de IDE, en el cual se han clasificado las alturas cada 50 m.

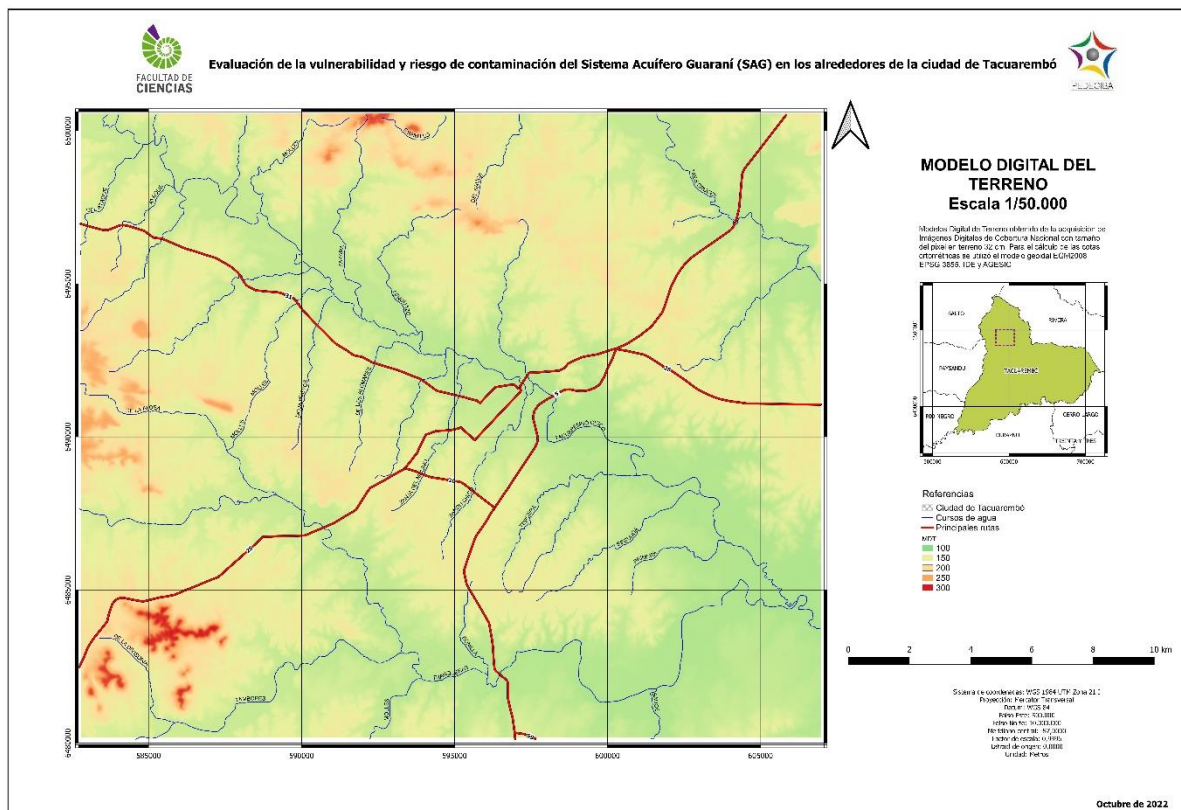


Figura 3. Mapa hipsométrico del área de estudio elaborado a partir del MDT de la IDE-AGESIC. (Link al mapa a escala original)

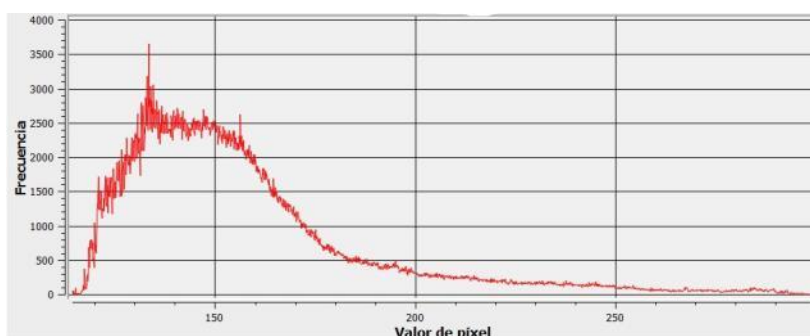
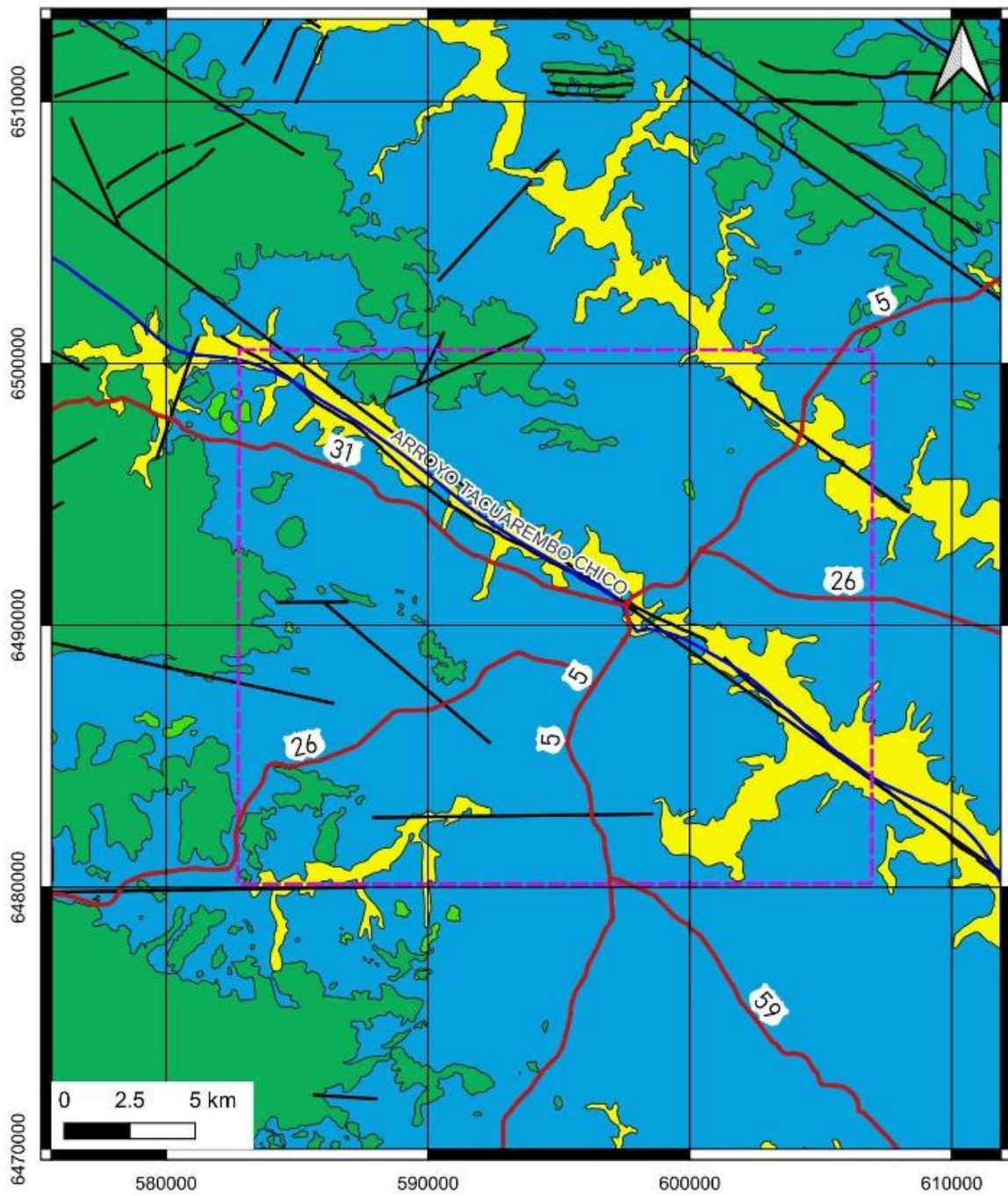


Figura 4. Histograma de clasificación de alturas

En promedio la cota del terreno está en el entorno de 135 m, siendo el intervalo de mayor ocurrencia el comprendido entre 120 y 180 m, tal como se puede observar en la Figura 4, la cual muestra la estadística de cotas del terreno a partir del conteo de pixeles de igual cota que abarcan el área en base al MDT.

Se pueden diferenciar dos elementos desde el punto de vista geomorfológico, al Oeste: los relictos del frente de retroceso de la Cuesta Basáltica que controlan algunos relieves elevados y pendientes más empinadas. Al Este, el área donde domina el relieve de suaves colinas sedimentarias donde afloran las rocas sedimentarias que forman las unidades constituyentes del SAG.

Un elemento importante a destacar en la configuración de los principales cursos de agua es que, en su mayoría, presentan controles estructurales que operan en la dirección principal NW-SE, variando a E-W. Esto se asocia a los fuertes rasgos morfoestructurales que posee el área de estudio (lineamientos) que se pueden observar en fotos aéreas de la región, con predominio de las direcciones NW así como también en los controles sobre la red de drenaje en general, como por ejemplo, al Sur del Arroyo Tacuarembó Chico donde los principales cursos presentan dirección NNE. En la Figura 5 se presenta el contexto geológico regional del entorno al área de estudio.



REFERENCIAS

- | | |
|--|---|
|  Rutas principales |  Planicies |
|  Cursos principales |  Formacion Arapey |
|  Area de estudio |  Formacion Rivera-Tacuarembó |
|  Lineamientos principales | |

Figura 5. Contexto geológico regional del área de estudio (tomado del proyecto ANNI - FMV_1_2019_1_155736).

Con referencia a la ocupación del suelo se presentan los datos obtenidos MGAP (2011 Tabla 1), siendo esta la última actualización de información disponible.

Uso del suelo	Area %
Zonas Urbanas	3.86%
Canteras, minas a cielo abierto	0.05%
Aguas artificiales	0.07%
Represas de riego	0.10%
Aguas naturales	0.11%
Bañados, humedales	3.08%
Bosque Nativo	9.43%
Bosque Plantado año 2021	18.55%
Bosque Plantado nuevo, rebrote, tala	0.08%
Campo Natural	48.68%
Campo Natural regenerado	15.19%
Olivares	0.00%
Agricultura de secano, verano	0.27%
Rastrojos de Arroz	0.00%
Arbustos	0.55%

Tabla 1. Uso del suelo según MGAP, 2021

La población según el censo INE del año 2011, que se asienta en la zona se describe en el Tabla 2, el mismo se desprende que el 66% de la población del departamento (90051 habitantes) reside en el área de estudio.

POBLACIÓN del ÁREA			
Total de Habitantes	Hombres	Mujeres	Hogares
59545	28826	30719	20420

Tabla 2. Número de habitantes y hogares según censo 2011 (INE, 2011)

En lo referente al clima, el mismo se clasifica el territorio continental del Uruguay le corresponde la clasificación climática de Koeppen (1918) "Cfa". Aunque entre distintos puntos del país es posible observar diferencias en los parámetros climáticos, estas no son de magnitud suficiente como para distinguir diferentes tipos de clima de acuerdo a clasificaciones clásicas como la de Koeppen.

Todo el territorio está comprendido dentro de las siguientes características. clima templado, moderado y lluvioso (temperatura del más frío entre -3° y 18°C): "tipo C"; clima de temperie húmeda (la lluvia es irregular, condiciones intermedias entre el w y el s de Koeppen): "tipo f"; variedad específica de temperatura (temperatura mes más cálido superior a 22°C): "tipo a" (INUMET, 2022).

De la base de datos del INIA – GRAS, Tacuarembó tiene una serie de datos para el período 2001-2021. En la Figura 6 se presentan los gráficos de los promedios mensuales para el período, para precipitación total acumulada, efectiva y evapotranspiración. Mientras tanto en la Figura 7 se expresan los valores de temperatura para el mismo período de tiempo.

La información que resulta muestra que en promedio la temperatura y precipitación media anual son de 23.1°C de 1481.3 mm/año respectivamente para la estación del INIA en Tacuarembó.

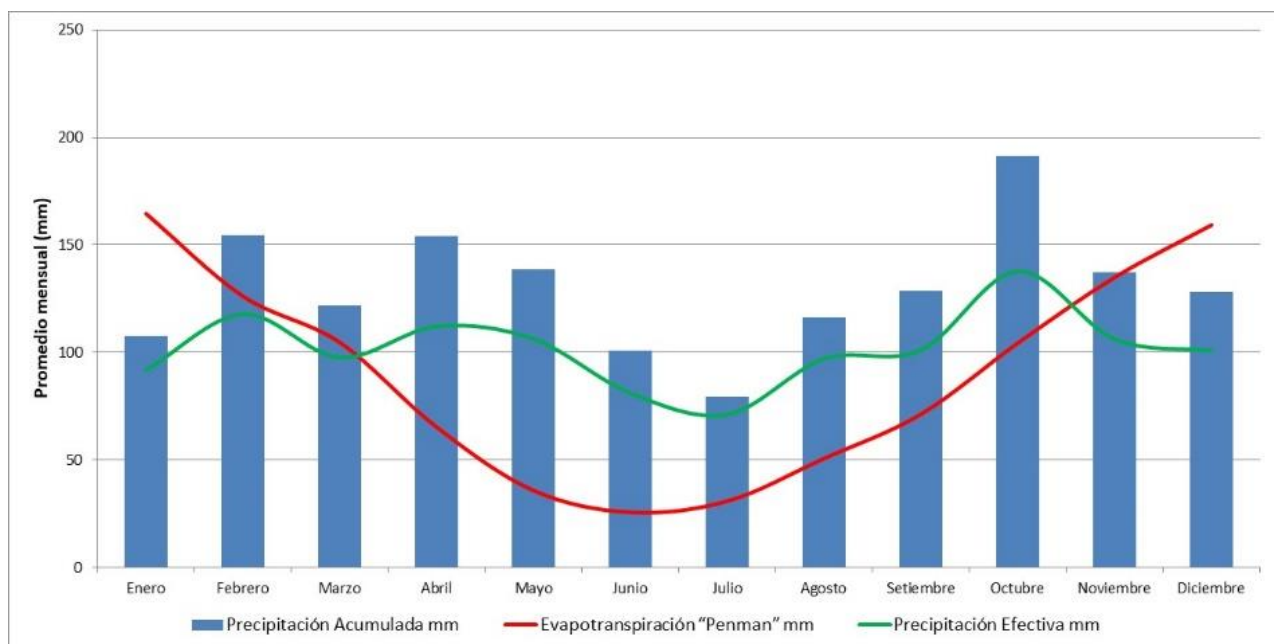


Figura 6. Promedios mensuales para el período 2001-2021 de precipitación acumulada, efectiva y evaporación Penman.

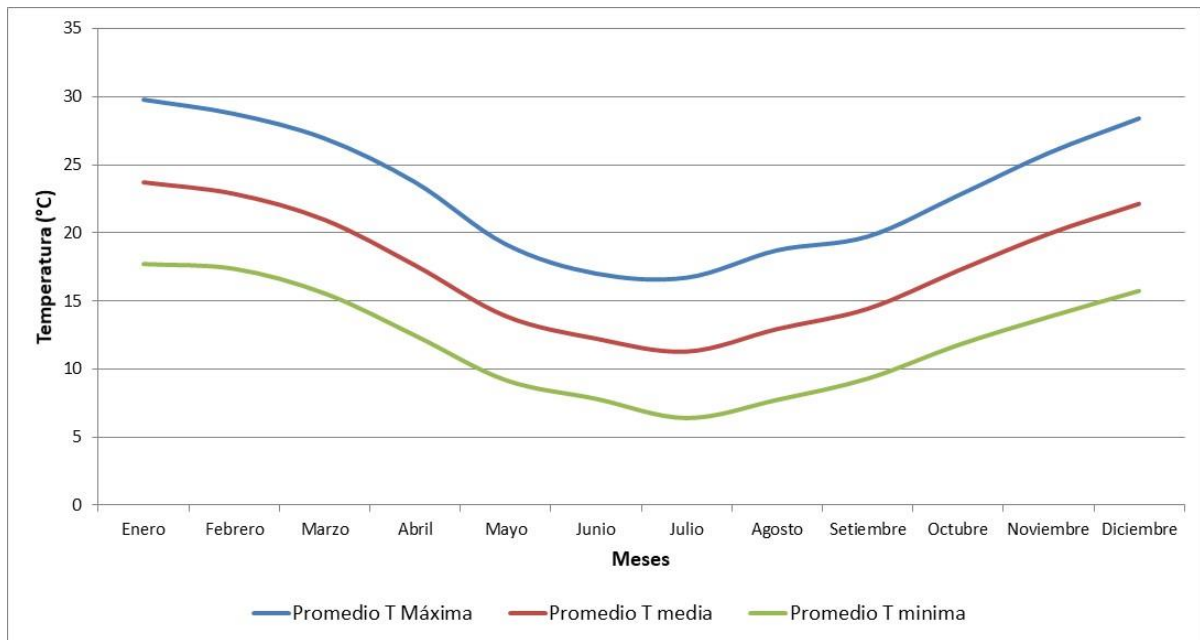


Figura 7. Promedios mensuales para el período 2001-2021 de temperaturas, máxima, media y mínima.

La zona de estudio abarca parte del área que presenta un Plan de Ordenamiento Territorial (POT) realizado por la Intendencia de Tacuarembó, se presenta en la Figura 8.

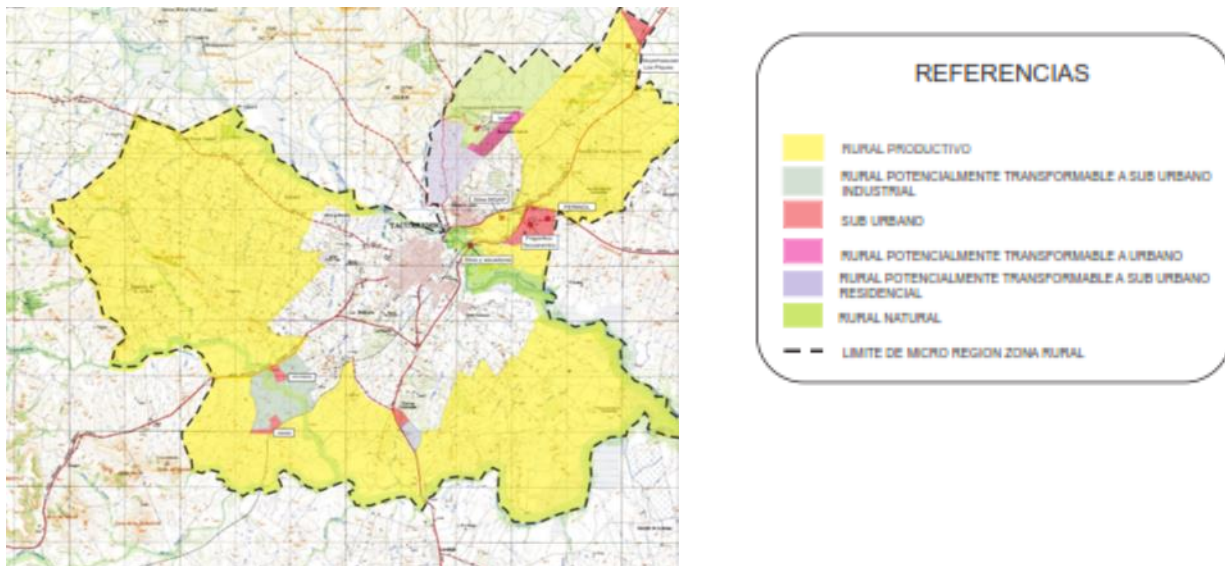


Figura 8. Plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Tacuarembó (Dirección de Ordenamiento Territorial y Planeamiento Urbano, 2012)

En dicho plan no se ha hecho referencia al cuidado de las aguas subterráneas, teniendo en cuenta que el desarrollo urbanístico se realiza exclusivamente sobre el acuífero.

Con respecto a la economía, se tiene información de todo el departamento. Según Uruguay XXI (2022), el ingreso medio per cápita es de \$13274 corrientes. En el Tabla 3 se presentan las principales productos exportados y destinos tomados del mismo informe.

			Destinos	U\$S x 10⁶	%
			China	206	41%
			Estados Unidos	122	25%
			México	22	4%
			Brasil	21	4%
			Países Bajos	18	4%
			Italia	15	3%
			Reino Unido	14	3%
			Vietnam	7	1%
			Otros	72	14%
			Total	497	100%
Exportaciones del departamento de Tacuarembó por producto, año 2021			Exportaciones del departamento de Tacuarembó por destino, año 2021		
Productos	U\$S x 10⁶	%			
Carne bovina	243	49%			
Madera	162	33%			
Subproductos cárnicos	49	10%			
Arroz	17	3%			
Carne ovina y caprina	11	2%			
Otros	15	3%			
Total	497	100%			

Tabla 3. Exportaciones, montos y destinos según Uruguay XXI – (2021)

4. Antecedentes

La primera mención que se realiza sobre el agua subterránea en la zona de estudio la hace el Ing. Lorenzo Buquet en 1943 en “Orientaciones generales para la Investigación de Aguas Subterráneas en la República” publicado por el Instituto Geológico del Uruguay. En él señala: “*Areniscas de Tacuarembó (38). - Estas areniscas forman un gran grupo, que en superficie se manifiesta, entre las rocas efusivas de Serra Geral (37) y los sedimentos de Gondwana. En ancha faja corren de Sur a Norte, en los Departamentos de Tacuarembó y Rivera desde unos pocos metros de espesor alcanzan profundidades relativamente grandes*”. Aquí hace mención a la perforación A1 de Tacuarembó, la que cabe señalar constituye la primera perforación realizada por el Instituto Geológico de Uruguay.

Más cercano en el tiempo, se tienen varios trabajos regionales sobre el SAG (IPT, 1980; TAHAL, 1996), las cartas hidrogeológicas elaboradas por DINAMIGE (1987, 2003), la contribución de Montañó y Carrión (1990) y, por último, el Informe Final de Hidrogeología del Proyecto Sistema Acuífero Guarani (LEBAC, 2008).

Por su parte, entre los trabajos de mayor detalle que comprenden el área de estudio se individualizan Carrión (1991), Collazo (2006) y Pochintesta (2018). Collazo (2006) y Pochintesta (2018) trabajaron también sobre la vulnerabilidad del acuífero, con la aplicación de distintos métodos de evaluación.

La geología del área de trabajo ha sido muy estudiada. Walther (1914) hace ya mención a “*Areniscas de Botucatu*” utilizando la nomenclatura brasileña para referirse a las unidades de nuestro territorio. Otros autores como Falconer (1931, 1937), Bossi (1966) Bossi et al. (1975), Preciozzi et al. (1985), Ferrando et al. (1987), Bossi y Ferrando (2001), PyT Consultora (2009), Perea et al. (2009) han trabajado en la delimitación de la unidad geológica, así como han utilizado distintos criterios litoestratigráficos para agrupar a este conjunto de rocas constituyentes del SAG.

En esta tesis, se adoptó el criterio de separar a la sucesión de areniscas que constituyen el SAG en dos formaciones, de base a techo: Tacuarembó y Rivera. La primera se apoya en forma discordante sobre la Formación Buena Vista (en el área de estudio exclusivamente en subsuelo) y hacia el techo, mantiene relaciones de contacto con la Formación Rivera y los basaltos de la Formación Arapey. Cabe señalar que la Formación Rivera, de escaso desarrollo en el área de estudio, se apoya exclusivamente sobre las areniscas de Tacuarembó y es recubierta también por las lavas de la Formación Arapey

Existen en el área un conjunto importante de cartas a diferentes escalas. El Proyecto ANII “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay”, ha realizado una revisión de las mismas con un detallado levantamiento de datos de campo (Carrión y Pochintesta, 2022).

Se resumen aquí los principales rasgos de las unidades geológicas que se desarrollan en el área de trabajo y que forman parte del relleno de la Cuenca Norte:

Sedimentos Recientes: bajo esta denominación informal se incluyen a los sedimentos localizados en las planicies y terrazas que se desarrollan en las proximidades de los principales cursos de agua. En general se trata de sedimentos removilizados de las unidades geológicas del área (principalmente Tacuarembó y en menor grado Rivera), constituidos por arenas finas a muy finas en una matriz limo, a limo arcillosa. De acuerdo con perforaciones ubicadas en las proximidades de los cursos de agua, se puede estimar el espesor de estos sedimentos, si bien son variables, están en el entorno de 10 m.

Formación Arapey: fue denominada así por Bossi (1966), localizándose en el extremo NO del país abarcando un área aproximada de 41.500 km². Está compuesta por una sucesión de basaltos reconocidos por primera vez por Walther (1911). La unidad presenta edades correspondientes al Cretácico Inferior, donde la mayoría se encuentran próximas a 130 - 132 Ma (Féraud et al., 1999). Por su petrografía, cada colada conserva ciertas características constantes permitiendo su identificación y diferenciación de otros derrames. Los rasgos mineralógicos dependientes de la composición química del basalto también son permanentes a nivel de cada colada. Los basaltos son de grano fino, de coloración grisácea oscura y de composición tholeítica. En el área de estudio, esta Formación se desarrolla en el Oeste y Noroeste, con espesores que no sobrepasan los 40 m.

Formación Rivera: reúne areniscas finas a medias, marrones a rojizas, con estratificación cruzada de gran porte y alto ángulo como característica distintiva de la unidad. Se interpreta como campos de dunas eólicas depositados bajo condiciones climáticas cálidas y áridas (Ferrando et al., 1987; Perea et al., 2009; do Amarante et al., 2019). Las paleocorrientes medidas en la estratificación cruzada indican vientos predominantemente en dirección NE (PyT, 2008; Perea et al., 2009).

Esta unidad se apoya exclusivamente sobre la Formación Tacuarembó, exhibiendo un contacto ondulante que denota la actuación de procesos erosivos que retrabajaron el techo de ésta última (Ferrando et al., 1987; do Amarante et al. 2019); así como otras veces un contacto neto y subhorizontal. Las características litológicas distintivas entre estas unidades sumadas a la naturaleza de los contactos, llevan a considerar que la separación en dos formaciones se ajusta de mejor forma a los criterios litoestratigráficos establecidos en las buenas prácticas estratigráficas.

En el área de estudio, también se observa que los procesos eólicos que formaron a las areniscas de la Formación Rivera persistieron aún durante el magmatismo basáltico y dan lugar a las litologías clásticas que forman parte de la Formación Arapey (Bossi 1966). Un ejemplo de esta situación se observa en la región basáltica del Camino de los Helechos, situado inmediatamente al norte de la ciudad de Tacuarembó. Esta unidad, en el área de estudio se desarrolla cubierta por los basaltos de la Formación Arapey, encontrándose muy poco expuesta en superficie, y se estima que la potencia máxima no alcanza a 20 m.

Se le asigna una edad Cretácico Temprano a la Formación Rivera por sus relaciones estratigráficas con las unidades infra y suprayacentes.

Formación Tacuarembó: reúne a una sucesión de areniscas finas a muy finas, subordinadamente más gruesas, blancas a blanquecinas, a veces rojizas, esencialmente cuarzosas, con intercalaciones de bancos de pelitas arenosas ocres, rojizas y verdosas (de Santa Ana y Veroslavsky, 2004; Perea et al., 2009). Las estructuras sedimentarias más conspicuas son la estratificación horizontal y subhorizontal, cruzada de pequeño a mediano porte, así como geometrías tabulariformes y lenticulares.

Se interpreta como depósitos fluviales y eólicos, donde se reconocen facies y asociaciones de facies de canales fluviales efímeros, canales *braided* de carácter permanente, depósitos de flujos no encausados y extensas planicies arenosas rasas. Estos sistemas fluviales se relacionan con eventos eólicos que se preservan intercalados a lo largo de toda la unidad y representan depósitos de sábanas de arena, dunas e interdunas húmedas (Perea et al., 2009; do Amarante et al., 2019).

Se apoya en discordancia sobre varias unidades neopaleozoicas del relleno de la Cuenca Norte. Su edad Jurásico Tardío – Cretácico Temprano está dada por su contenido fosilífero en peces, moluscos, tortugas, cocodrilos, ostrácodos, coprolitos, tiburones dulceacuícolas y dinosaurios (Perea et al. 2001, 2009; Soto et al., 2021).

Esta unidad está presente en el 100% del área de estudio, aflorando, por debajo de los sedimentos recientes, la Formación Rivera y los basaltos de Arapey. La potencia promedio está en el orden de 90 m, la que ha sido verificada en el estudio realizado sobre varias perforaciones profundas disponibles.

Formación Buena Vista: está compuesta por una sucesión de areniscas finas a medias, rojas a blanquecinas, que se intercala con niveles pelíticos rojos y conglomerádicos, caracterizando a ambientes transicionales proximales y a sistemas continentales (fluviales y eólicos). Alcanza su mayor desarrollo y espesor en la región infrabasáltica del sector occidental de la Cuenca Norte, donde supera los 670 m. Presenta una potencia de 170 m en el pozo Bañado de Rocha; 113 m en Tacuarembó.

Esta unidad fue descripta por Falconer (1931, 1937) como “Areniscas de Buena Vista” y las integró a lo que denominó “Areniscas y esquistos de Estrada Nova” haciendo referencia a la similitud litológica con las unidades de la Cuenca Paraná en territorio brasileño. De Santa Ana (1989) y de Santa Ana & Ucha (1994), redefinieron a la Formación Buena Vista para todo el ámbito de la cuenca y la integraron a un evento depositacional Permo-triásico.

Actualmente, se le asigna una edad Pérmico Superior (Veroslavsky et al., 2021). Sólo se reconoce en el área de estudio en las perforaciones más profundas.

5. Metodología utilizada

A continuación, se refiere a la metodología y procedimientos para la elaboración de los diferentes estudios y productos elaborados en esta tesis. En la Figura 9 se presenta un flujograma de la secuencia de trabajo.

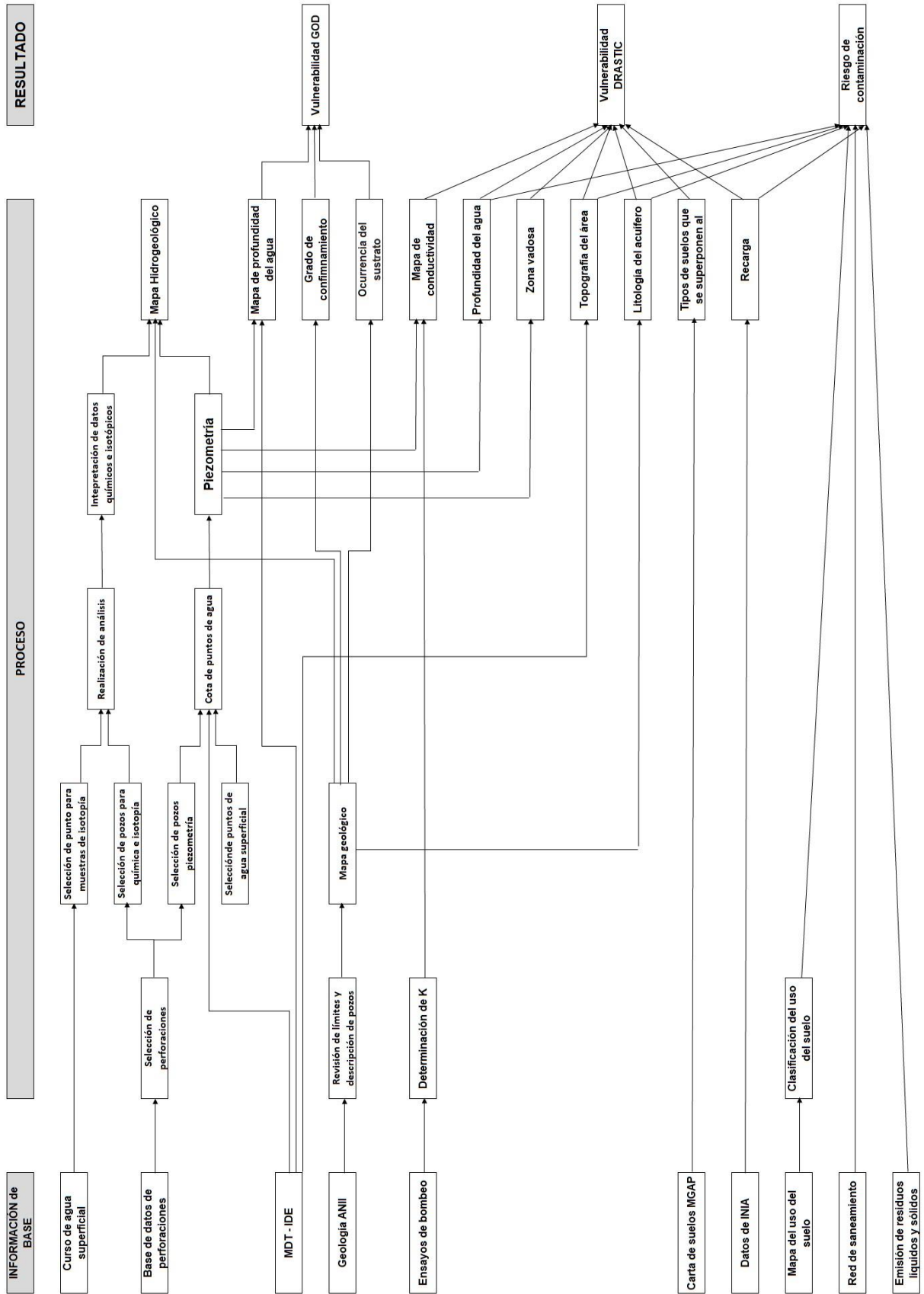


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología empleada en este estudio

5.1. Base de datos de perforaciones

La base de datos de perforaciones del área fue trabajada en conjunto con el proyecto ANII: “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del SAG en áreas de recarga en Uruguay”. Se obtuvo información de varios organismos públicos como DINAMIGE, OSE y DINAGUA, de trabajos científicos, e informes que fueron detallados en los antecedentes. También se obtuvo información de la empresa perforadora GEO AGUAS SUBTERRÁNEAS LTDA. (TECNOAGUA) que posee una gran actividad en el área.

Se obtuvo datos e información de 295 perforaciones, las cuales cuentan con información variada (profundidad, caudal, nivel estático y dinámico, perfil geológico y ubicación, principalmente). No todas las perforaciones que fueron relevadas para este trabajo fueron parte de la construcción de los mapas, habiéndose realizado una selección. Toda esta información fue incorporada al Sistema de Información Geográfica del Piloto Tacuarembó (SIGPT) del proyecto ANII antes referido (actualmente en etapa de revisión final para su difusión pública) y se uniformizaron los términos utilizados por las distintas bases consultadas. A su vez se incorporó información sobre la química del agua, ya sea de antecedentes y de muestras que fueron tomadas y analizadas durante ese proyecto. (Disponible en: [Base de datos de pozos](#))

Posteriormente se seleccionaron perforaciones que contaran con muestras conservadas, lo que permitió delimitar los pases formacionales. Para ello se eligieron pozos profundos cuyos testigos se conservan en la litoteca de la DINAMIGE.

Algunas de las perforaciones vistas ya contaban con descripción de otros autores, no obstante, se realizó su revisión a los efectos de obtener una descripción y verificar aspectos consagrados de su litología (Figura 10). A partir de estos trabajos de geología de subsuelo se pudo realizar un análisis y posterior interpretación, lo más ajustada posible, de la configuración espacial de la sucesión de areniscas que contiene el Acuífero Guaraní en el área de trabajo.



Figura 10. A- Actividades de descripción litológica realizada 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.

5.2. Piezometría

Para la interpretación de la piezometría se trabajó con la base de datos de perforaciones del área que se tienen en el proyecto ANII: “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del SAG en áreas de recarga en Uruguay”.

La densidad de pozos por área no tiene una distribución uniforme, por lo que existen zonas extensas con escasa a nula información y otras con exceso de la misma. Por este último motivo se realizó una selección de pozos por proximidad. Esto consistió en lo siguiente, si en un entorno de 250 m de un pozo existían más de uno, se seleccionó solo uno, asignándole un promedio de la cota del nivel estático. Si las diferencias eran muy notorias se verificaba la información descartándose aquellos que no eran confiables.

La cotas de los pozos utilizados para la interpretación piezométrica fueron tomadas a partir del modelo digital del terreno (MDT) obtenido de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), utilizando el software qGis con el complemento “*Point sampling tool*”, esta herramienta realiza el muestreo de puntos de una capa *shape* y le asigna valores a partir de una capa *ráster* del MDT.

A partir de esta selección, se obtuvieron 184 puntos para la confección de la piezometría. A estos se le agregaron puntos de cota del pelo de agua de los principales cursos de agua. La metodología empleada fue similar a la expuesta para las perforaciones, se confeccionó una capa de puntos relevantes de los cursos de agua y se les asignó la cota a partir del MDT. Con esto se llegó a 205 puntos con cotas del nivel del agua. (disponible en: [Base de datos piezometría](#)).

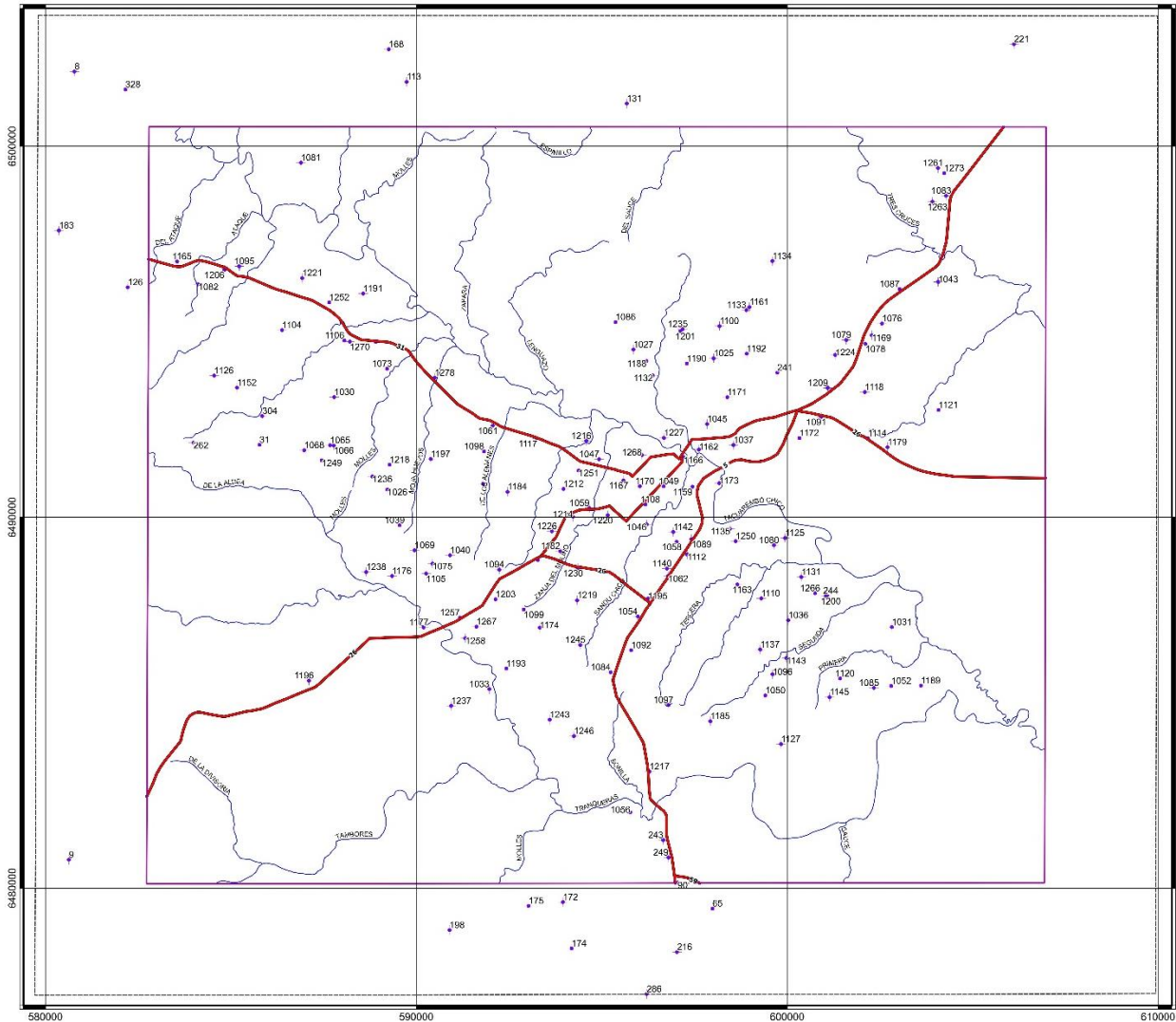


Figura 11. Distribución de perforaciones utilizadas para la confección de la piezometría del área piloto

A los efectos de obtener una mejor interpolación, se tomaron perforaciones fuera del área del piloto (línea violeta, figura 11) con un buffer de 3000 m en torno a la misma. Con esto se obtuvo una mejor resolución de la construcción de curvas en la interpolación. En las figuras antes referidas se pueden ver zonas con las diferentes densidades de información.

Para la interpolación se utilizó *Kriging*, en el cual las medias locales no son necesariamente próximas de la media de la población, usándose apenas los puntos vecinos para la estimación. Es el método más ampliamente recomendado para este tipo de interpolación. El software utilizado fue el GIS SAGA que viene incluido en el paquete de qGIS.

Una vez obtenidos los resultados por la interpolación, se procedió a redigitalizar las líneas, teniendo que el acuífero en estudio tiene un funcionamiento de libre a semi libre, se tuvieron en cuenta la intersección de curvas con cursos de agua principales, unión de curvas que quedaban desconectadas entre si y pequeños círculos que se generaban y que no eran coherentes con la piezometría.

5.3. Hidroquímica e isótopos

La evaluación de los elementos químicos que componen el agua pueden brindar información sobre los procesos naturales y/o las actividades antrópicas que influyen cualitativamente sobre el agua subterránea (Custodio, 1983) En particular, ese autor señala que la hidrogeoquímica estudia y analiza el flujo de agua como vehículo de transporte de las características fisicoquímicas, químicas e isotópicas, constituyéndose en una herramienta fundamental para el conocimiento de los ambientes hidrogeológicos.)

Las técnicas de la evaluación de la hidroquímica del agua se basan en el estudio de la presencia de los principales iones, a saber:

Aniones: Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-

Cationes: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}

pH, temperatura y conductividad

Así mismo se utilizaron como complemento los isótopos estables (^{18}O y ^2H), que permiten tener una evaluación sobre el origen y mezcla del agua subterránea. Se miden de forma rápida y se puede utilizar de forma razonable como trazadores conservativos.

En la naturaleza existen dos isótopos estables del hidrógeno (^1H - protio y ^2H - deuterio) y tres isótopos estables del oxígeno (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O). De las nueve moléculas de agua

isotópicamente diferentes sólo H_2^{16}O , H_2^{18}O y $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ se originan en la naturaleza en concentraciones cuantificables. La concentración isotópica o las relaciones de las abundancias generalmente se refieren a las de un estándar específico escogido.

El estándar internacionalmente aceptado para las relaciones isotópicas del hidrógeno y del oxígeno es Estándar del Agua Media Oceánica de Viena (Vienna Standard Mean Ocean Water, V-SMOW) (Coplen, 1996). Las relaciones isotópicas absolutas $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del V-SMOW son iguales a:

$$\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} = {}^2R = 1.5 \times 10^{-4} \qquad \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} = {}^{18}R = 2 \times 10^{-3}$$

La Línea de Agua Meteórica (Dansgaard 1964) refleja la relación que existe entre los valores $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la precipitación, que se expresa por la siguiente relación matemática:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

Las variaciones de la abundancia de los isotopos estables son muy pequeñas, por eso se expresan como una relación en base a un estándar multiplicado por 1000.

$$\delta^{18}\text{O} \text{‰} = 1000 \times \left[\frac{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ muestra}}{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ estandar}} - 1 \right]$$

δ es la desviación isotópica. Por lo tanto, cuando δ es negativo nos indica que la muestra de agua está enriquecida respecto al estándar y cuando es positivo el agua está empobrecida respecto al estándar.

La toma de muestras de agua, de perforaciones y superficial se planificó previamente para tener una distribución uniforme sobre la totalidad del área de estudio. Esto siempre y cuando se tuvieran pozos que fueron relevados de la base de datos. Se eligieron pozos de diferentes profundidades, cuando fue posible, y sobre cursos de agua que fueran representativos de la hidrografía.

En la puesta en práctica, la mayor dificultad se encontró en el muestreo de perforaciones, ya que en muchos casos no era posible extraer la muestra de un punto directo del pozo o la perforación seleccionada dado que o no existía o no tenía equipo de bombeo. Por ese

motivo durante el trabajo de campo se fueron modificando los puntos de muestreo en función de las posibilidades develadas en los relevamientos de campo.

En todas las perforaciones analizadas se tomaron muestras para análisis físico – químico y de isotopos estables (^{18}O y ^2H), y se realizaron determinaciones de pH, conductividad y temperatura en el sitio.

Se elaboró un simple protocolo de muestreo, del cual se resumen los principales puntos:

Ficha de campo con la identificación de la muestra y los datos levantados en campo, coordenadas, pH, conductividad, temperatura.

Rotulación de los envases, número de la muestra y fecha.

Bombeo del pozo durante un tiempo prudencial, a los efectos de renovación del agua dentro del mismo.

Las muestras para determinaciones físico – químico, las botellas se lavan 2 a 3 veces con el agua de la captación

Los recipientes se llenan hasta el borde, procurando no dejar una cámara de aire entre el agua y el tapón de cierre. Ya que serán transportado en forma inmediata al laboratorio no se utilizaron conservantes.

Los recipientes para mayores serán de 250 ml en frascos PEAD.

Los recipientes para isótopos serán de 30 ml en vidrio oscuro y doble tapa.



Figura 12. Toma de muestra de perforación A) en los alrededores de Valle Edén, B) toma de muestra de agua superficial

El análisis de elementos mayores fue realizado en el Laboratorio de Agua y Suelos, del Departamento del Agua, Centro Universitario de Norte, UDELAR, bajo la supervisión de la Dra. Elena Alvareda. Las determinaciones se realizaron para alcalinidad por titulación y el resto de los parámetros con un equipo de cromatografía (Figura 13)



Figura 13. A) equipos que fueron utilizados para la determinación por titulación (izquierda) y B) equipo de Cromatografía Iónica (derecha) del Departamento del Agua, Centro Universitario de Norte, Salto, UDELAR

Las determinaciones de isótopos fueron realizadas por el Laboratorio de Isótopos Estáveis do Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, fueron realizados por la técnica de Espectroscopia Laser (Figura 15) bajo la supervisión técnica del Prof. Didier Gastmans.

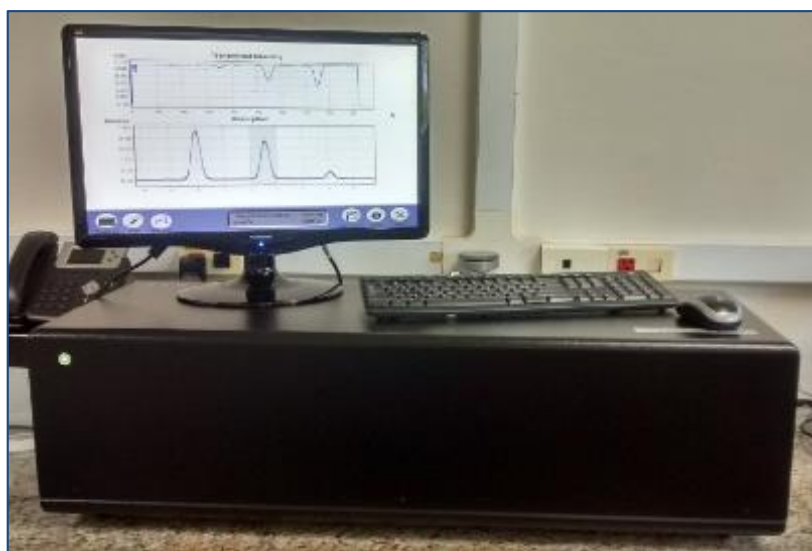


Figura 14. Equipo de espectroscopia Laser del Laboratorio de la UNESP en el Campus de Rio Claro, San Pablo donde se realizaron los estudios isotópicos.

En la Tabla 4 y la Figura 15 se exhiben los puntos visitados para la recolección de muestras.

Muestra	Origen	XUTM	YUTM	Tipo de análisis
M4	Pozo	591156	6486944	Q + I
M5	Pozo	592780	6488299	Q + I
M6	Pozo	594432	6491259	Q + I
M7	Pozo	593452	6472036	Q + I
M8	Pozo	599646	6489245	Q + I
M9	Pozo	601367	6485638	Q + I
M10	Pozo	596871	6491206	Q + I
M11	Pozo	605148	6499662	Q + I
M12	Pozo	604275	6498837	Q + I
M14	Pozo	600920	6492705	Q + I
M15	Pozo	596584	6492934	Q + I
M17	Pozo	588404	6494682	I
M19	Pozo	589892	6492490	I
M20	Pozo	588659	6491256	I
M23	Pozo	577923	6478840	I
M24	Pozo	597928	6484500	I
M13	Superficial	604166	6497104	I
M18	Superficial	586544	6498344	I
M21	Superficial	600171	6489742	I
M22	Superficial	578076	6479046	I
M25	Superficial	596502	6482243	I
M16	Superficial	598191	6495828	I
RC30	Superficial	625149	6462577	I
RC31	Superficial	628261	6489352	I
RC32	Superficial	616572	6489001	I
RC33	Superficial	581089	6500255	I
RC34	Superficial	603686	6507311	I
RC35	Superficial	587890	6481245	I
RC36	Superficial	592875	6469272	I

Tabla 4. Listado de puntos con muestra de agua.

Q= química, I= isótopos

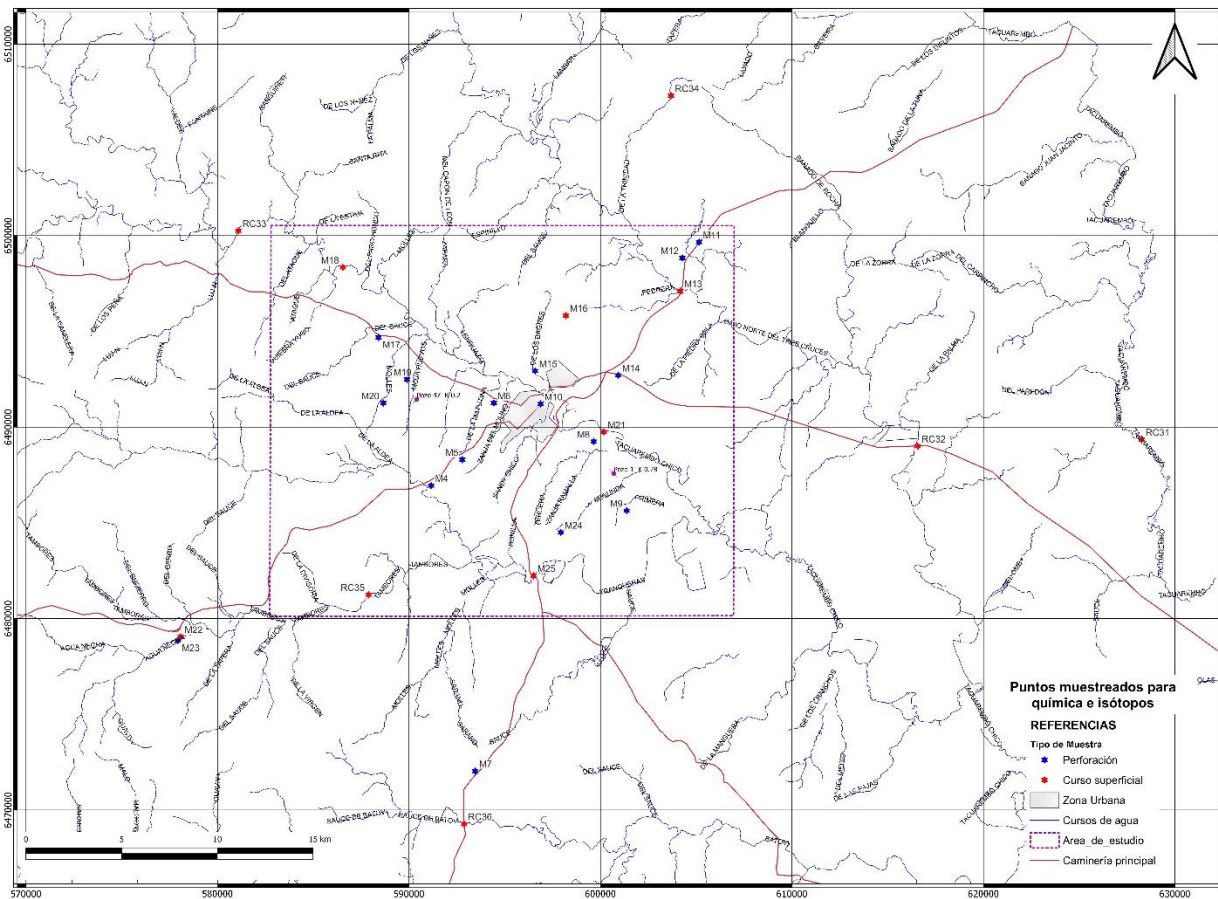


Figura 15. Mapa de puntos de muestreo.

La toma de muestras de agua de pozos para la determinación de elementos mayores se realizó el día 10 de marzo de 2021. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de CENUR – Salto para que fueran tratadas para las determinaciones. Concomitante con la toma se realizaron determinaciones de pH, Temperatura y Conductividad Eléctrica en campo, en el Tabla 8 se muestran los valores obtenidos mientras que en la Tabla 9 los resultados de esos parámetros en laboratorio. Finalmente, la Tabla 10 muestra los valores obtenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$.

En el caso de las aguas superficiales se aplicó el criterio de muestreo de aguas arriba (naciente o próximo a ellas) curso medio y curso ya fuera del área de estudio, a los efectos de evaluar cómo era la evolución del contenido e ^{18}O a lo largo del curso.

5.4. Métodos para evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero

Inicialmente, la expresión “vulnerabilidad intrínseca” tuvo diferentes significados para los diferentes técnicos que trabajaban o trabajan en temas de la hidrogeología. *Vulnerabilidad* se comenzó a utilizar, en forma intuitiva, a partir de la década de la década de 1970 en Francia (Albinet y Margat, 1970) y, posteriormente, se comenzó a utilizar con más rigurosidad (Haertle, 1983; Aller *et. al.*, 1987; Foster e Hirata, 1988).

En principio el término fue usado sin definición formal, aunque hacía referencia a la susceptibilidad del acuífero a ser afectado por la contaminación antrópica, el cuál empezó teniendo diferentes significados para diferentes investigadores.

Una definición útil y consistente de vulnerabilidad es la de considerar a la contaminación del acuífero como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno. Esto determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie (Foster et al., 1987).

De esta forma, vulnerabilidad a la contaminación del acuífero sería función de:

- a) la accesibilidad de contaminantes a la zona saturada del acuífero, en un sentido hidráulico
- b) la capacidad de atenuación de los estratos sobreyacentes a la zona saturada, resultantes de la retención o reacción físico-química de los contaminantes.

5.4.1. Método GOD

El método GOD (**G**roundwater hydraulic confinement, **O**verlying Strata, **D**epth to groundwater table) 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 1990, debido a su claridad conceptual y a la simplicidad para su aplicación.

El método considera dos factores básicos:

- a) el grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada
- b) la capacidad de atenuación de los estratos sobreyacentes a la zona saturada del acuífero.

Estas variables no son directamente medibles, dependen a su vez de la combinación de distintos parámetros. Dado que la información relacionada con la mayoría de estos parámetros no está generalmente disponible, para desarrollar el mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de una forma práctica, es inevitable realizar una simplificación de esta lista.

Sobre la base de tales consideraciones, el índice de vulnerabilidad **GOD**, (Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988) 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.

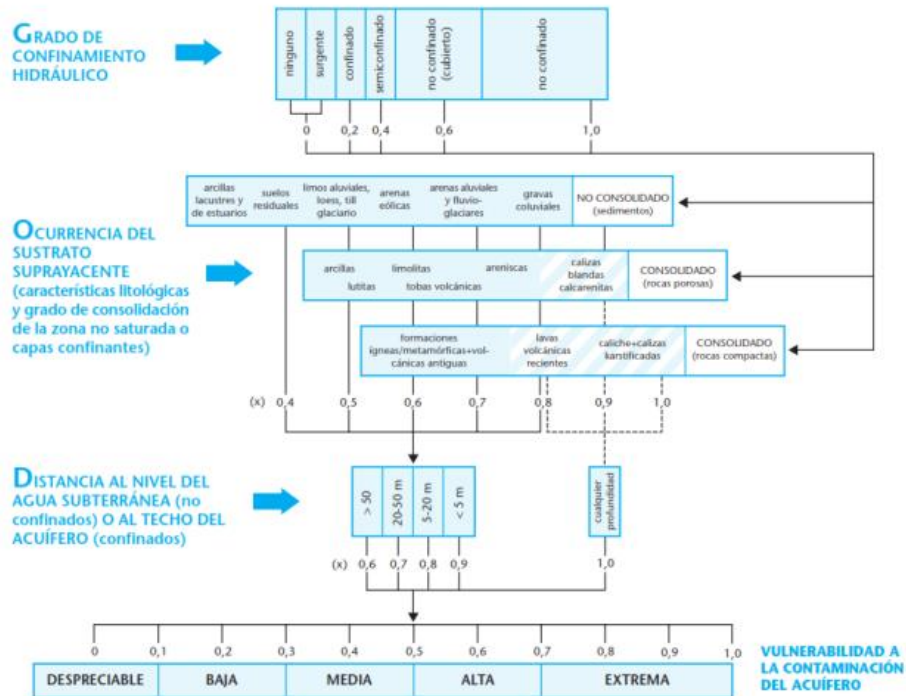


Figura 16. Parámetros utilizados en el método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Foster et al., 2002)

Una vez definidos los parámetros que se proponen, se aplica la fórmula:

$$V_{GOD} = G \times O \times D$$

De esta fórmula se desprenden que los valores de GOD pueden variar en el intervalo $0 \leq GOD \leq 1$.

A partir del criterio del método, se realizaron las siguientes consideraciones para la definición de los parámetros:

G = tipo de acuífero

La definición del tipo de acuífero se realizó a partir de la existencia de cobertura de basaltos sobre las areniscas de las formaciones Rivera o Tacuarembó, por lo que se definieron dos clases, confinado y libre a semi libre.

Esto llevó a tener una restricción importante, ya que los basaltos pueden permitir el ingreso de agua al sustrato de arenas que recubren, en general de la Formación Rivera, por sus fisuras. La unidad Tacuarembó en muchos casos no es totalmente libre, pudiéndose considerar en caso como semi libre, pero resulta de difícil separación zonas donde se pueda

comportar de distintas categorías, por lo que se tomó a los efectos de la valoración el peor escenario.

O = litología de la zona no saturada

La definición de las diferentes características de la zona no saturada, se basó en la litología, tal como es la propuesta el método. Por lo cual se definieron tres categorías, los basaltos, las areniscas de las formaciones Rivera y Tacuarembó y los sedimentos recientes a los cuales se les asignó un valor menor a las areniscas ya que presentan un mayor contenido de limo y arcilla.

D = Profundidad el agua

La confección del mapa de profundidad del agua se utilizó la piezometría obtenida sobre la que se realizó una reclasificación en base a los parámetros propuestos por el método.

5.4.2. Método DRASTIC

El método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero fue desarrollado, como señalado, a inicios de la década de 1980 y publicado en junio de 1987 por la EPA bajo el título "*DRASTIC, A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*" (Aller et al., 1987).

El mismo propone crear 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.

La potencial contaminación de un acuífero está dada por una combinación de factores hidrogeológicos, influencias antropogénicas y fuentes de contaminación en cualquier área determinada. Esta metodología ha sido diseñada para incluir sólo los factores hidrogeológicos que presentan influencia en una posible polución potencial del acuífero

En la aplicación del método se consideraron 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 contaminación de las aguas subterráneas, se describen a continuación.

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

C = conductividad hidráulica del acuífero

A partir de los parámetros anteriores se aplica la siguiente fórmula para para obtener los valores de DRASTIC para distintos puntos del área.

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

Como se puede apreciar los parámetros profundidad del agua, recarga y zona no saturada son los que tienen mayor peso en la fórmula de cálculo, siendo la topografía del terreno y el tipo de suelo los que presentan menor peso.

Profundidad del agua

La profundidad del agua es importante ya que determina el espesor de material a través del cual un contaminante debe viajar antes de llegar al acuífero, esto permite una mayor posibilidad de atenuación a medida que aumenta la profundidad del agua, porque implican tiempos de viaje más largos.

La presencia de capas de baja permeabilidad que confinan los acuíferos también limitará el viaje de los contaminantes a un acuífero.

Los rangos de profundidad al agua como se definen, se han determinado en base a lo que se consideran profundidades donde el potencial de agua subterránea la contaminación cambia significativamente.

Para la confección del mapa se utilizó la piezometría obtenida y se realizó una reclasificación en base a los parámetros propuestos por el método.

Recarga neta del acuífero

La fuente del agua subterránea es la precipitación que infiltra a través de la superficie del suelo. La recarga neta representa la cantidad de agua por unidad de superficie que penetra en la superficie del suelo y alcanza el nivel freático. El agua de recarga está disponible para transportar un contaminante verticalmente a la capa freática y horizontalmente dentro del acuífero. Además, la cantidad de agua disponible para la dispersión y dilución del contaminante en la zona vadosa y en la zona saturada es controlada por este parámetro. El agua de recarga, por lo tanto, es un vehículo principal para la lixiviación y el transporte de contaminantes sólidos o líquidos al nivel freático. Cuanto mayor sea la recarga, mayor será el potencial de contaminación de las aguas subterráneas. Esta afirmación general es cierta hasta que la cantidad de recarga es lo suficientemente grande como para causar la dilución del contaminante, en cuyo punto el potencial de contaminación de las aguas subterráneas deja de aumentar y en realidad puede disminuir.

Tal como se utiliza en la metodología, la recarga neta se define como la cantidad total de agua que se aplica a la superficie del suelo y se infiltra para llegar al acuífero. La recarga neta incluye la cantidad anual promedio de infiltración y no tiene en cuenta la distribución, intensidad o duración de eventos de recarga. Los valores de recarga son menos precisos y más difíciles de obtener que los valores para otros parámetros de DRASTIC.

La estimación de la recarga se realizó en base a la información brindada por INIA-GRAS, la cual realiza un balance diario del agua en base a un modelo logarítmico (ver <http://www.inia.uy/gras/Monitoreo-Ambiental/Balance-H%C3%ADrico/Modelo-logaritmico-BH>).

La referida institución nos brindó la información acumulada mensualmente en el período 2000 – 2021, a partir de la cual se obtuvo el exceso de agua anual, que fue tomada como recarga potencial.

A su vez para la valoración de las zonas de recarga del acuífero, se tuvo en cuenta la litología presente y las descargas del acuífero que se determinaron en base a la piezometría.

Tipo de litología del acuífero

El medio acuífero se refiere a la roca consolidada, o no, que sirve como medio para la circulación del agua. El sistema de flujo dentro del acuífero se ve afectado por el medio. La dirección y sentido del trayecto que debe seguir un contaminante se rigen por el flujo del sistema acuífero. Es por lo tanto un control importante (junto con conductividad hidráulica y gradiente) para determinar el tiempo disponible para que se produzcan procesos de atenuación como sorción, reactividad y dispersión.

La ruta que tomará un contaminante puede estar fuertemente influenciada por la fracturación o por una serie interconectada de aberturas de disolución que pueden proporcionar vías para un flujo más fácil. En general, cuanto mayor sea el tamaño de grano y cuantas más fracturas o aberturas haya en el acuífero, mayor será la permeabilidad.

En una primera aproximación en la clasificación de la litología del acuífero se tomaron las dos principales unidades geológicas que lo componen, formaciones Rivera y Tacuarembó. Como se desprende de la cartografía geológica la unidad predominante es la segunda de las nombradas y se incluyó la Formación Rivera, ya fuera aflorante o la que se encuentra recubierta por la Formación Arapey.

Asimismo, se utilizó un parámetro distinto que el propuesto por DRASTIC a los efectos de poder diferenciarlas, ya que de seguir el criterio propuesto serían ambas de igual incidencia (valor 6), por ello se mantuvo el valor 6 para la Formación Rivera y se propuso el valor 4 para la Formación Tacuarembó.

Tipos de suelos que se superponen al acuífero

Los medios de suelo se refieren a la parte superior de la zona vadosa caracterizada por una importante actividad biológica. Para efectos de este documento, el suelo se considera comúnmente la zona superior meteorizada de la tierra que promedia una profundidad de seis pies o menos desde la superficie del suelo. El suelo tiene un impacto significativo en la cantidad de recarga que puede infiltrarse en el suelo y, por lo tanto, de la capacidad de un

contaminante para moverse verticalmente en la zona no saturada. La presencia de materiales de textura fina como limos y arcillas pueden disminuir las permeabilidades relativas del suelo y restringir la migración de contaminantes. Además, donde la zona del suelo es bastante gruesa, los procesos de atenuación de la filtración, la biodegradación, la sorción y la volatilización pueden ser bastante importante. Así, para ciertas prácticas de superficie terrestre, como la agricultura aplicaciones de pesticidas, el suelo puede tener la influencia principal en la contaminación potencial. En general, el potencial de contaminación de un suelo se ve afectado en gran medida por el tipo de arcilla presente, el potencial de contracción/hinchamiento de esa arcilla y el tamaño de grano del suelo. En general, cuanto menos se encoja y se hinche la arcilla y cuanto menor sea el tamaño del grano, menor será el potencial de contaminación. la cantidad de material orgánico presente en el suelo también puede ser un factor importante particularmente en la atenuación de pesticidas.

La clasificación de suelos en la evaluación de la vulnerabilidad, fue tomada a partir de la cartografía del MGAP-DG NR a escala 1/100000, en la cual se expresa el contenido de arena, limo y arcilla de cada unidad de suelo. Por ello pareció que el contenido de arena en el suelo sería el mejor parámetro para la clasificación, ya que de ello depende la capacidad de infiltración del agua y por lo tanto el posible contaminante.

Topografía

El método utiliza el término "topografía" para designar la pendiente y su variación dentro del área de estudio. La misma ayuda a controlar la probabilidad de que un contaminante se escurra o permanezca en la superficie de una zona el tiempo suficiente para infiltrarse. La pendiente del terreno influye en la mayor o menor posibilidad que un contaminante alcance el acuífero, también se relaciona con el suelo y por supuesto en el escurrimiento, tanto del agua superficial como la posible interacción con la subterránea.

Cuando las pendientes son bajas (0 a 2%) un contaminante tiene mayor probabilidad de alcanzar el acuífero por infiltración. Cuando las pendientes son mayores existe una mayor escorrentía del agua superficial y por lo tanto una baja probabilidad de que un contaminante acceda al sistema acuífero.

Este parámetro en la zona se evaluó a partir del Modelo Digital del Terreno que presenta la IDE - AGESIC, clasificándola su ponderación en acuerdo con los criterios seguidos por el método.

Zona vadosa

La zona vadosa se define como aquella zona por encima del nivel freático que está insaturado o discontinuamente saturado. El tipo de medio de zona vadosa determina las características de atenuación del material por debajo del típico horizonte del suelo y por encima del nivel freático. Biodegradación, neutralización, la filtración mecánica, la reacción química, la volatilización y la dispersión, son todos procesos que pueden ocurrir dentro de la zona vadosa. La cantidad de biodegradación y la volatilización disminuye con la profundidad. Los medios también controlan el camino longitud y enrutamiento, afectando así el tiempo disponible para la atenuación y la cantidad de material encontrado. El enrutamiento está fuertemente influenciado por cualquier fractura presente. Los materiales en la parte superior de la zona vadosa también ejercen una influencia en el desarrollo del suelo.

Los medios de la zona vadosa han sido designados con nombres descriptivos de cada medio, enumerados en orden creciente de potencial de contaminación de las aguas subterráneas, se analizan como sigue:

- a) Capa de confinamiento
- b) Limo/Arcilla
- c) Roca metamórfica/ígneas - Roca consolidada de metamórfica o ígneas
- d) Caliza
- e) Arenisca
- f) Arena y grava con una cantidad significativa de limo y arcilla
- h) Arena y grava (limpia)

La selección de los medios de la zona vadosa depende de si el acuífero a ser evaluado es confinado o no confinado. En el caso de un acuífero no confinado o semiconfinado, que será evaluado como ilimitado, el usuario deberá seleccionar los medios más significativos que influyen en el potencial de contaminación.

El criterio utilizado para definir la litología y ponderación de la litología de la zona no saturada, fue separa en tres unidades: los basaltos, las formaciones Rivera y Tacuarembó, cuando son aflorantes, y los sedimentos recientes.

Conductividad hidráulica del acuífero

Se refiere a la capacidad de los materiales del acuífero para transmitir agua, que a su vez controla la velocidad a la que el agua subterránea fluye bajo un gradiente hidráulico dado. La velocidad a la que el agua subterránea circula, controla la velocidad a la que un contaminante se aleja del punto por donde ingresa al acuífero. La conductividad hidráulica está controlada por la interconexión de espacios vacíos dentro del acuífero, que pueden ocurrir como consecuencia de la porosidad o la fracturación.

Para DRASTIC, la conductividad hidráulica se divide en rangos donde las conductividades hidráulicas altas están asociadas con un mayor potencial de contaminación.

Los valores de conductividad hidráulica se calculan a partir del bombeo del acuífero pruebas La información sobre la conductividad hidráulica generalmente está disponible en informes hidrogeológicos publicados o tesis de maestría.

La conductividad hidráulica del acuífero es de los parámetros más complejos de cuantificar, ya que para ello se hace necesario contar con ensayos de bombeo que permitan la valoración de este parámetro. De la bibliografía consultada solo existen dos valores de conductividad hidráulica, Montañó (2005) (ver Tabla 5):

X	Y	T	K
600687	6487580	15.7	0.78
590402	6491452	4.1	0.2

Tabla 5. Puntos con ensayo de bombeo, tomado de Montañó (2005)

Dado que con estos valores tendríamos una superficie uniforme del valor de K, se decidió realizar una clasificación en dos zonas, una que abarcara el área donde las curvas

piezométricas eran más distantes (gradiente menor) y por lo tanto se puede inferir una mayor conductividad hidráulica y otra zona, en la cual las curvas se apretaban, y coincidían con los puntos que se tenían valores de K y se acercaban a las descargas del acuífero.

5.5. Riesgo de contaminación

El peligro o riesgo de contaminación del agua subterránea puede ser definido como la probabilidad de que el agua subterránea en la parte superior de un acuífero sea contaminada en un nivel inaceptable por las actividades que se desarrollan en la superficie del terreno sobreyacente (Foster e Hirata, 1988; Adams y Foster, 1992).

El concepto fundamental de evaluación de riesgos se basa en la existencia de tres componentes: fuente de contaminantes peligrosos, vectores de exposición y receptor (Figura 17). Todos estos componentes deben estar presentes simultáneamente (Oliveira, 2016).

El propósito de la elaboración de este mapa en este trabajo es crear un modelo conceptual que sirva de base para delimitar la evaluación riesgo cuantitativo, sólo para aquellos contaminantes, vectores y receptores, que presenten el mayor potencial para contribuir a un riesgo medible.

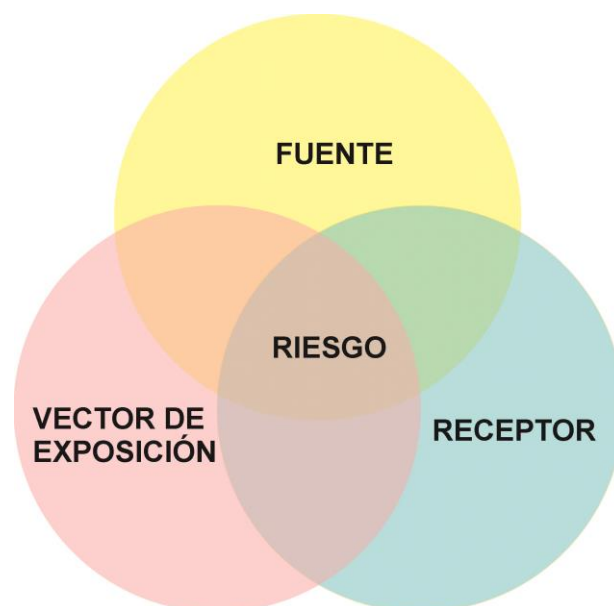


Figura 17. Esquema de evaluación del riesgo tomado de Oliveira (2016)

El riego de contaminación del acuífero requiere una evaluación exhaustiva de los posibles puntos de ingresos de contaminantes al mismo. Existen dos tipos de riegos: puntal y difuso, el primero se basa en identificar emprendimiento donde se desarrollan actividades tales como industrias, sitios de disposición final de residuos doméstico y/o industriales, plantas de tratamiento de efluentes y planta de potabilización de aguas. En el segundo caso, se debe apuntar al uso agrícola del suelo y área urbanizadas con o sin saneamiento.

En la región podemos realizar una primera categorización de fuentes de contaminación en puntuales y difusas. Las fuentes más comunes de contaminación del agua subterránea se pueden resumir en:

- áreas urbanas, actividades agrícolas, aguas residuales
- sitios de disposición de residuos, industriales, estaciones de servicio.

Ciertas actividades en las áreas urbanas y agrícolas son difíciles de controlar ya que a menudo coinciden con riesgos tales como: vertidos accidentales, transporte favorecido por las partículas, goteos no cuantificables o no localizables y condiciones meteóricas no predecibles que tienen lugar después de incidentes o aplicaciones, respectivamente.

En la tabla 6, se presentan las principales fuentes de contaminación y los tipos de contaminantes a tener en cuenta de esas actividades.

FUENTE DE CONTAMINACIÓN	TIPO DE CONTAMINANTE
Actividad Agrícola	nitratos; amonio; pesticidas; organismos fecales
Saneamiento <i>insitu</i>	nitratos; hidrocarburos halogenados; microorganismos
Gasolineras y Garajes	hidrocarburos aromáticos; benceno; fenoles; hidrocarburos halogenados
Disposición de Residuos Sólidos	amonio; salinidad; hidrocarburos halogenados; metales pesados

FUENTE DE CONTAMINACIÓN	TIPO DE CONTAMINANTE
Industrias Metalúrgicas	tricloroetileno; tetracloroetileno; hidrocarburos halogenados; fenoles; metales pesados; cianuro
Pintura y Esmaltes	alcalobenceno; hidrocarburos halogenados; metales; hidrocarburos aromáticos; tetracloroetileno
Industria Maderera	pentaclorofenol; hidrocarburos aromáticos; hidrocarburos halogenados
Tintorerías	tricloroetileno; tetracloroetileno
Manufactura de Pesticidas	hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénico
Disposición de Lodos Residuales Domésticos	nitratos; hidrocarburos halogenados; plomo; cinc
Curtiembres	cromo; hidrocarburos halogenados; fenoles
Exploración/Extracción de Gas y Petróleo	salinidad (cloruro de sodio); hidrocarburos aromáticos
Minas de Carbón y de Metales	acidez; varios metales pesados; hierro; sulfatos

Tabla 6. Contaminantes comunes del agua subterránea y fuentes de contaminación asociadas. Tomado de Foster (2002)

Para la evaluación del riesgo se utilizaron varias fuentes de información a saber:

- ✓ Mapa del uso del suelo del Ministerio de Ganadería y Agricultura del año 2021

- ✓ Red de saneamiento de la ciudad de Tacuarembó extraída del SIG – WEB de la Administración de las Obras Sanitarias del Estado
- ✓ Distribución de puntos de emisión de residuos líquidos y sólidos del SIG – WEB del Ministerio de Ambiente

Existen diferentes criterios para evaluar el Índice de Susceptibilidad a la contaminación, aquí aplicaremos la propuesta de Stigter et al. (2006). Estos autores proponen utilizar los principales parámetros de DRASTIC (D = profundidad del agua, R = recarga neta del acuífero A = tipo de litología del acuífero, T = topografía del área) y agregan el uso del suelo (US).

A partir de estos parámetros se evalúa el uso del suelo con los siguientes índices, tabla 7:

Tipo de uso	Clasificación
Aguas artificiales	0
Represas de riego	0
Aguas naturales	0
Bosque Nativo	0
Campo Natural	0
Campo Natural regenerado	30
Bañados, humedales	50
Bosque Plantado año 2021	50
Bosque Plantado nuevo, rebrote, tala	50
Olivares	50
Agricultura de secano, verano	50
Rastrojos de Arroz	50
Arbustos	50
Zonas Urbanas	75
Canteras, minas a cielo abierto	80

Tabla 7. Clasificación del uso del suelo

A partir de esos valores se realiza una cuantificación del uso, a los efectos de aplicar los valores en la fórmula:

$$IS = 0.186 \times D + 0.212 \times R + 0.256 \times A + 0.12 \times T + 0.222 \times US$$

IS= índice de susceptibilidad

D, R, A y T son los valores que utiliza el método DRASTIC

US= uso del suelo

Con estos valores obtenidos se clasifica el riesgo de acuerdo a los puntajes mostrados en la Tabla 8.

Clasificación	Puntaje
Muy bajo	< 5
Bajo	5 - 10
Medio	10 - 15
Alto	15 - 20
Muy alto	> 20

Tabla 8. Índice de riesgo de contaminación

A partir del Mapa del uso del suelo del Ministerio de Ganadería y Agricultura del año 2021, se ha realizado una clasificación de los usos según su importancia.

Con la información del Ministerio de Ambiente, OSE y recorridas de campo se confeccionó el mapa de fuentes puntuales.

Aplicando la propuesta de Stigter, et al (2006), se realizó la clasificación de suelos según su peligrosidad, para luego calcular el Índice de Susceptibilidad, que lo hemos tomado como una aproximación al ingreso de contaminantes al acuífero.

6. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los trabajos realizados sobre la geología, hidrogeología, vulnerabilidad y riesgo de contaminación del Acuífero Guaraní en el área de estudio.

6.1. Geología

El mapa geológico base es el presentado por el Proyecto ANII “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay”, en la cual se ajustaron algunos límites ya que la escala es de mayor detalle., (ver Figura 18).

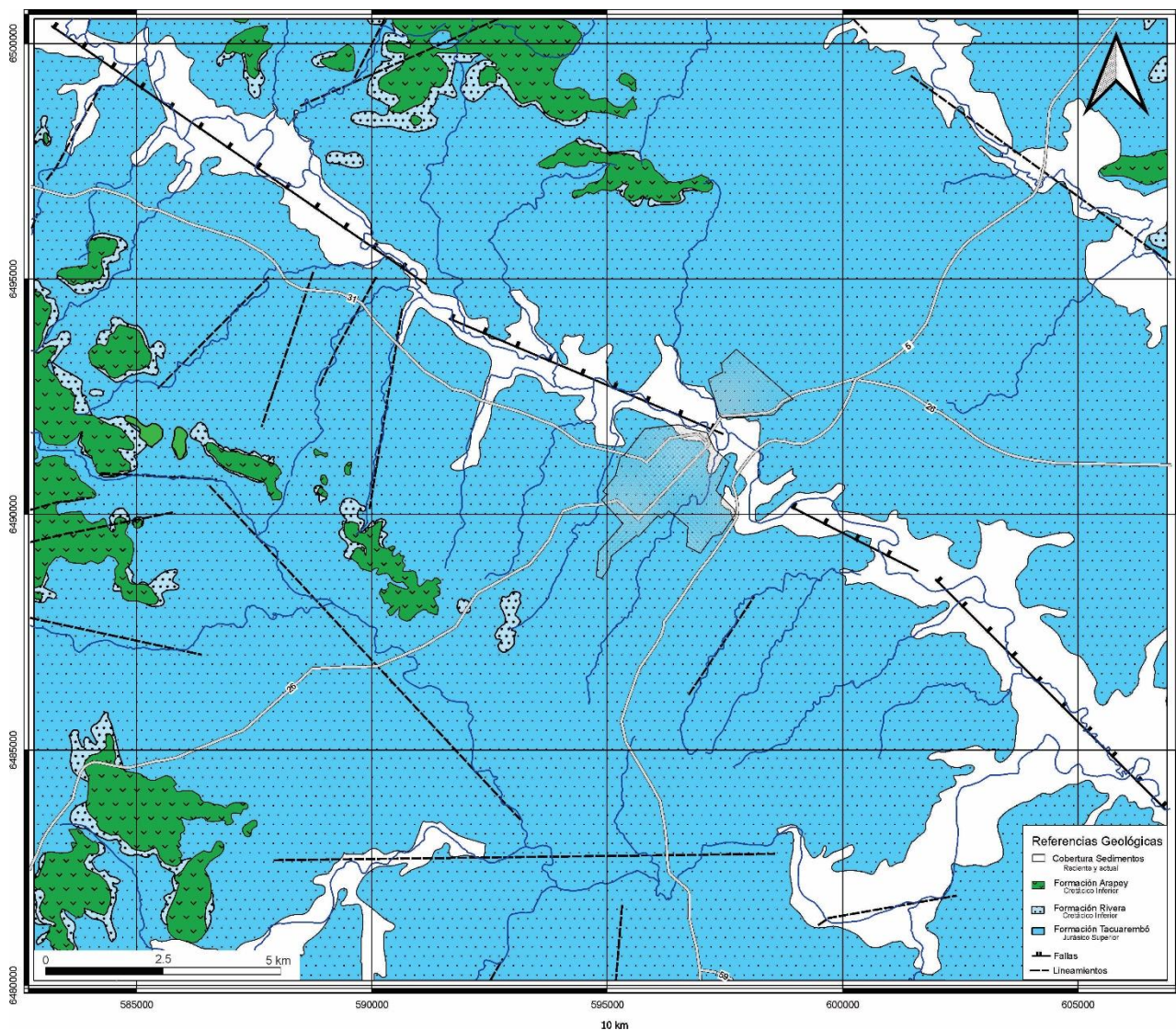


Figura 18. Mapa geológico del piloto Tacuarembó (Carión y Pochintesta, 2022) – (Link al mapa a escala original).

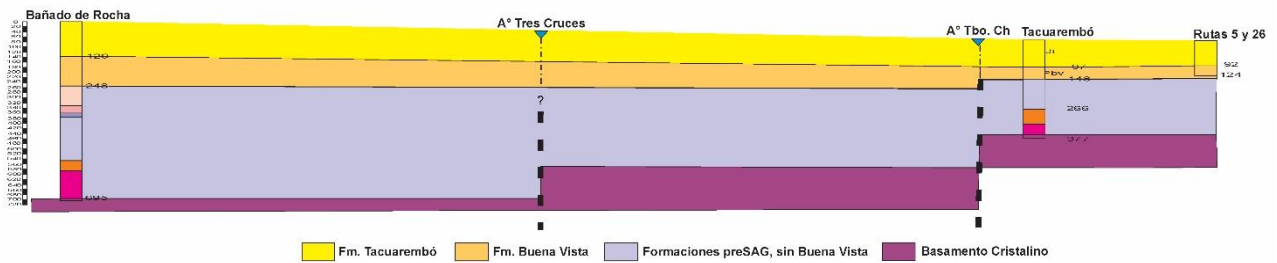


Figura 19. Corte Geológico NE – SO del área de estudio

En la figura 19 se representa un corte de las formaciones geológicas que contienen al acuífero (formaciones Tacuarembó y Rivera, figura 19) y su base en contacto con las areniscas de la Formación Buena Vista. Todas las unidades subyacentes a la Formación Tacuarembó se agrupan como formaciones PreSAG, sin incluir a la Formación Buena Vista. Asimismo, se detalla la configuración del Basamento Cristalino en el área de estudio. En el mismo se pueden observar los lineamientos estructurales de dirección NW-SE que se han representado en el mapa geológico. Estos lineamientos son reflejos de antiguas fallas con rechazos importantes que afectaron a la sedimentación Paleozoica de la Cuenca Norte, mientras que sólo actuaron como fracturación (diaclasas), o en algunos casos pequeñas fallas luego de la sedimentación jurocretácica, sin afectar la continuidad física del acuífero. Estas estructuras NW también controlaron la salida y emplazamiento del magmatismo eocretácico, lo que se refleja en los *trends* de varios diques que cortan al SAG.



Figura 20. Exposición de la Formación Tacuarembó en desmonte de camino vecinal



Figura N° 21. Detalle del mismo afloramiento de la Formación Tacuarembó

6.2. Piezometría

En la Figura 22 se presenta la piezometría del área de estudio. Se aprecian dos divisorias de aguas subterráneas que son coincidentes con la divisoria de aguas superficiales. La descarga se da hacia los cursos de aguas superficiales, con gradientes que varían entre 0.022 y 0.004, con una media de 0.011 ± 0.005 , que fue obtenida a partir de 20 medidas. Las variaciones de los niveles estáticos de las perforaciones utilizadas para la piezometría tienen una media de 12.15 m, con máximo de 49.00 m y mínimo de 0.00 m, con desviación de 7.91 metro.

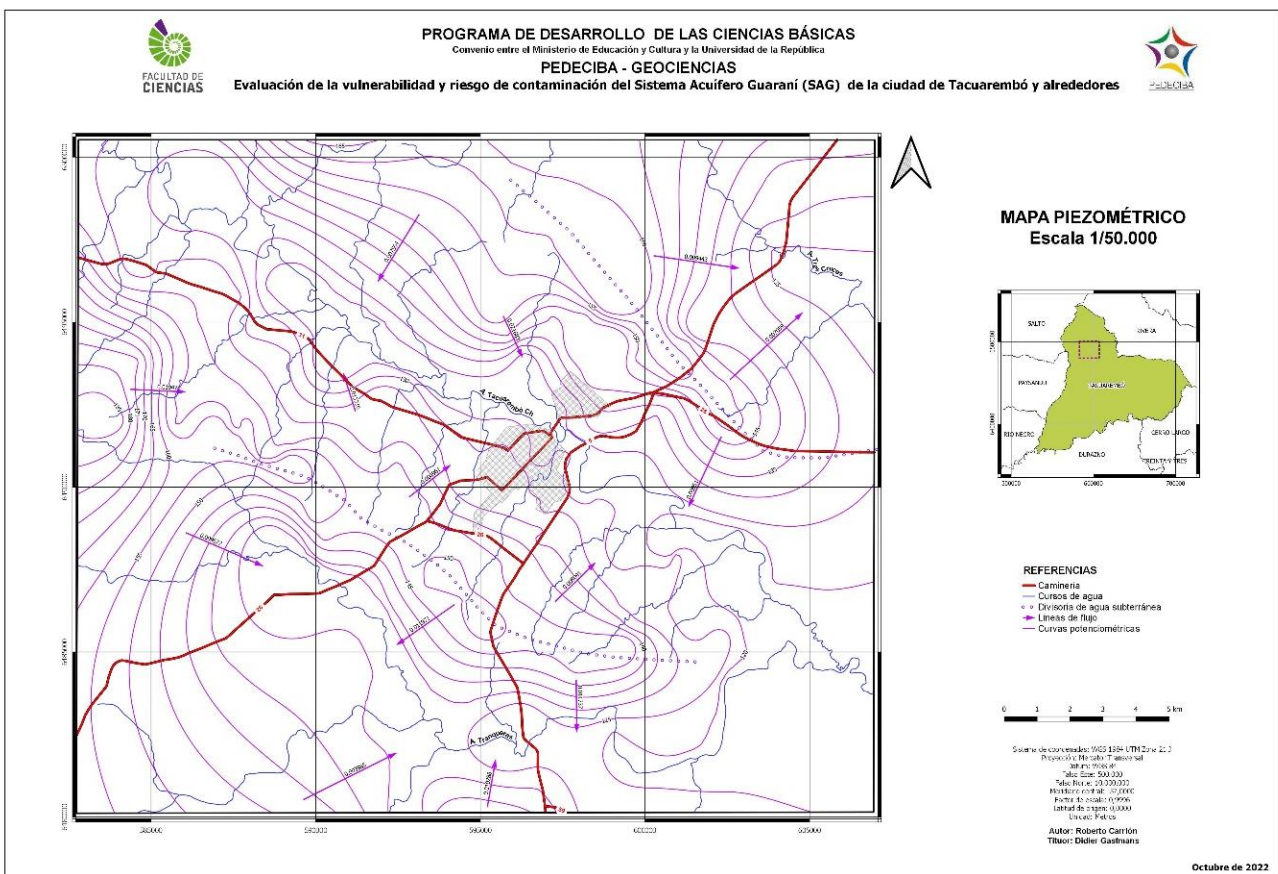


Figura 22. Mapa piezométrico del área de estudio – (Link al mapa a escala original)

6.3. Hidroquímica

6.3.1 Elementos mayores

Como fue expuesto en la metodología, se realizó la toma de muestra para la determinación de parámetros físico químicos del agua subterránea. En las Tablas 9 y 10 se presentan los resultados de los parámetros obtenidos en campo, así como las determinaciones realizadas en el laboratorio del Departamento del Agua del Centro Universitario de Norte.

Muestra	X _{UTM}	Y _{UTM}	Fecha muestreo	pH campo	Temperatura °C	Cond. campo [uS/cm]
M4	591156	6486944	10/3/2021	7.53	18.5	735
M5	592780	6488299	10/3/2021	5.96	19.4	47
M6	594432	6491259	10/3/2021	6.44	19.2	312
M8	599646	6489245	10/3/2021	7.20	18.4	914
M9	601367	6485638	10/3/2021	7.14	19.3	700
M10	596871	6491206	10/3/2021	7.62	18.0	890
M11	605148	6499662	10/3/2021	7.89	19.1	350
M12	604275	6498837	10/3/2021	8.21	18.8	380
M14	600920	6492705	10/3/2021	6.82	19.5	360
M15	596584	6492934	10/3/2021	8.34	18.9	540

Tabla 9. Datos medidos en campo durante el muestreo

Muestra	pH	Cond Campo	Balance	ΣCations[meq]	ΣAnions[meq]	Ca[mg/L]	Mg[mg/L]	Na[mg/L]	K[mg/L]	HCO3[mg/L]	CO3[mg/L]	Cl[mg/L]	SO4[mg/L]	NO3[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	7.2	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 10. Resultados analíticos de los principales iones y balance de los mismos

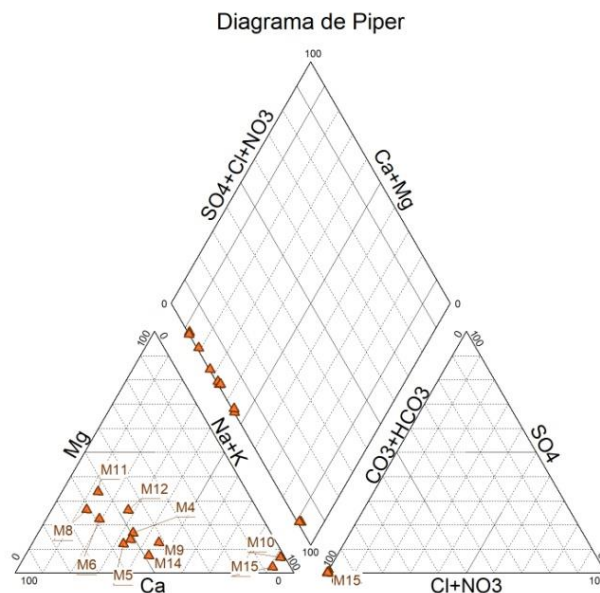


Figura 23. Diagrama de Piper

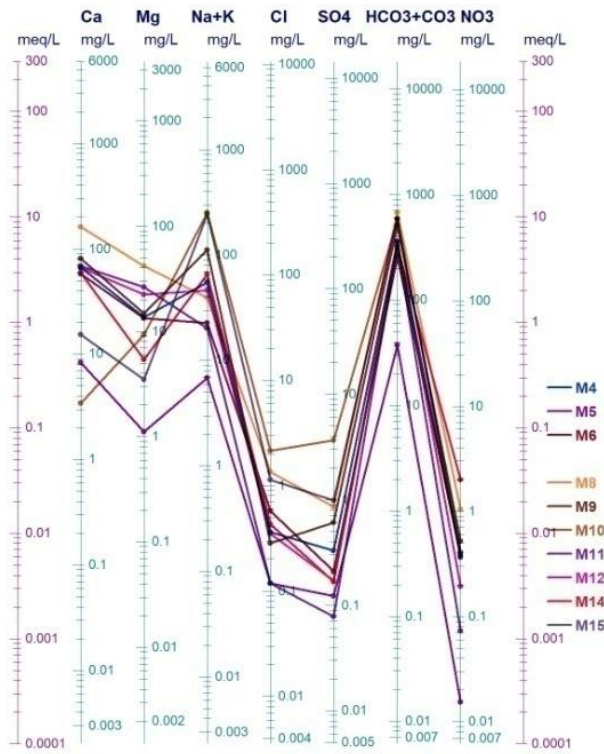


Figura 24. Diagrama de Schoeller

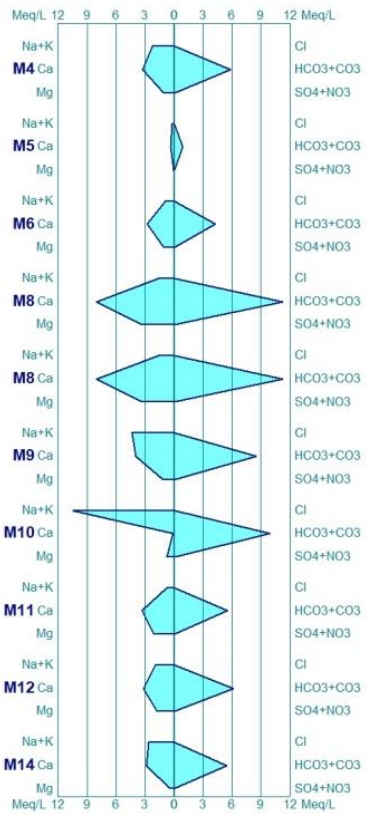


Figura 25. Diagrama de Stiff

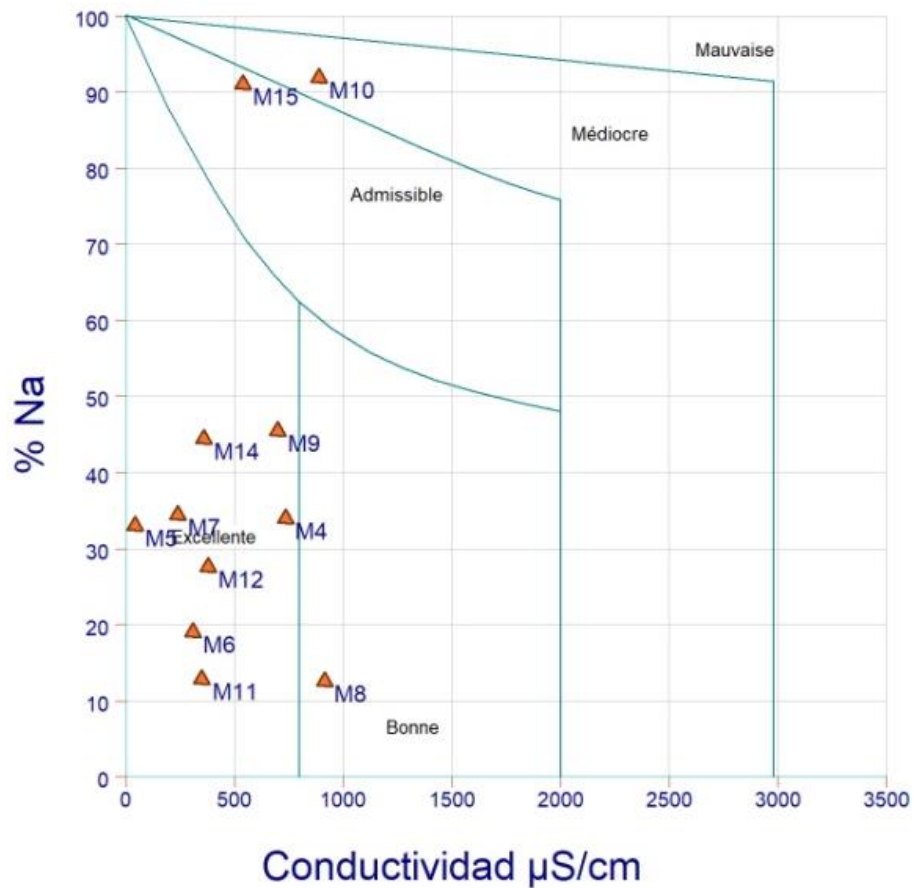


Figura 26. Diagrama de Wilcox

A partir de los gráficos clásicos utilizados en hidrogeología (figuras 23, 24 y 25), el agua del acuífero se puede clasificar en general, a partir de la información que nos brindan en Bicarbonatada Cálcica Sódica, predominado como por ejemplo las muestras M10 y M15 el sodio.

En la zona, el riego con agua subterránea es mínimo debido principalmente a los caudales de las perforaciones, no obstante, se realizó una clasificación de la misma a los efectos de evaluar su aptitud para ese fin, salvo las muestras que tienen un alto contenido de sodio (M10 y M15) las restantes son catalogadas como excelente a buena, como se ve en el gráfico de Wilcox, (figura 26).

6.3.2. Isótopos estables

En la Tabla 11 se presentan los resultados isotópicos de las muestras de aguas superficiales y subterráneas, que fueron analizadas por Laboratorio de la UNESP en el Campus de Rio Claro.

Muestra	Nº 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

Tabla 11. Resultados de analíticos de ^{18}O y ^2H de muestras del área de estudio

En promedio, se tiene que el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ para el agua de lluvia de Porto Alegre es de -4.74 ± 1.36 ‰ VSMOW y para la lluvia de Montevideo es de -4.74 ± 1.33 ‰ VSMOW (figura 27), por lo que se pueden considerar aguas con una misma marca isotópica. En agua superficial presenta valores que promedian -4.10 ± 1.34 y la subterráneas es de -5.52 ± 0.45 (figura 28).

Si se tiene en cuenta el escurrimiento superficial y se toma los valores obtenidos de $\delta^{18}\text{O}$ sobre el Arroyo Tacuarembó Chico, se observa que aguas arriba (RC33) presenta valores de -3.70 ‰ VSMOW, cuando el agua avanza en el curso, muestra M18 tiene -5.98 ‰ VSMOW y en M21 tiene -6.36 ‰ VSMOW, ya en un punto fuera del área el $\delta^{18}\text{O}$ es de -2.06 ‰ VSMOW (muestra RC30). Esto nos indicaría que el agua del acuífero para la época en que fueron tomadas las muestras para sus determinaciones recarga el curso superficial, ya que estos valores son similares a los de los pozos cercanos al curso.

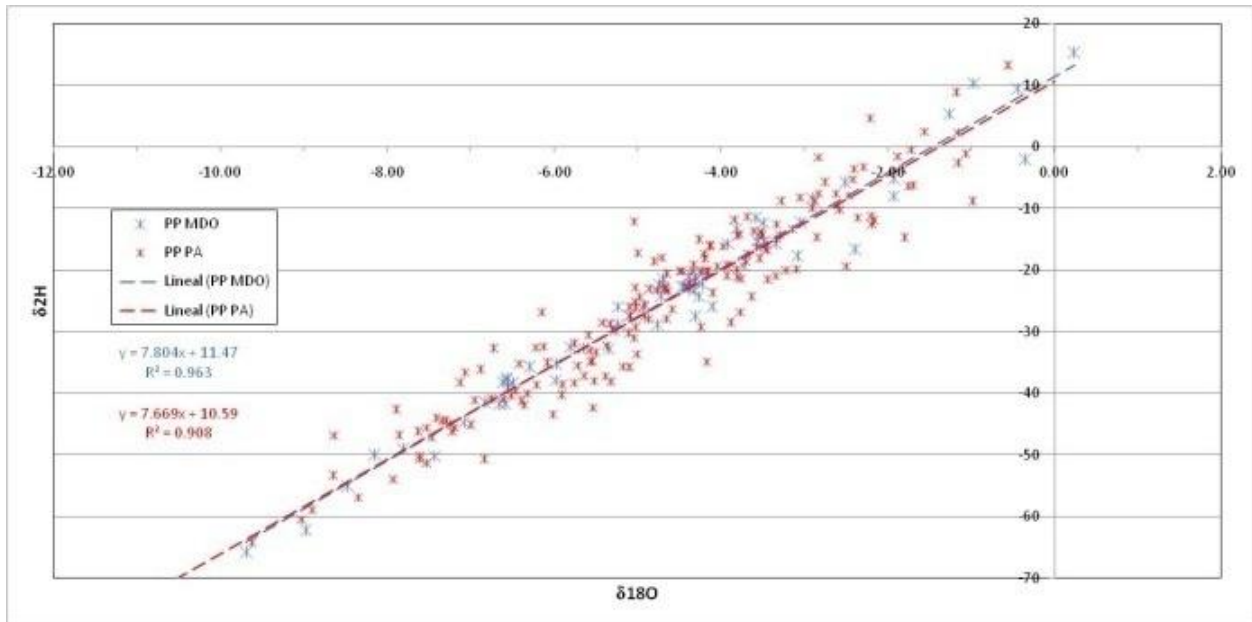


Figura 27. Isótopos de aguas de lluvia de las estaciones Montevideo y Porto Alegre (IAEA/WMO Global Network of Isotopes in Precipitation)

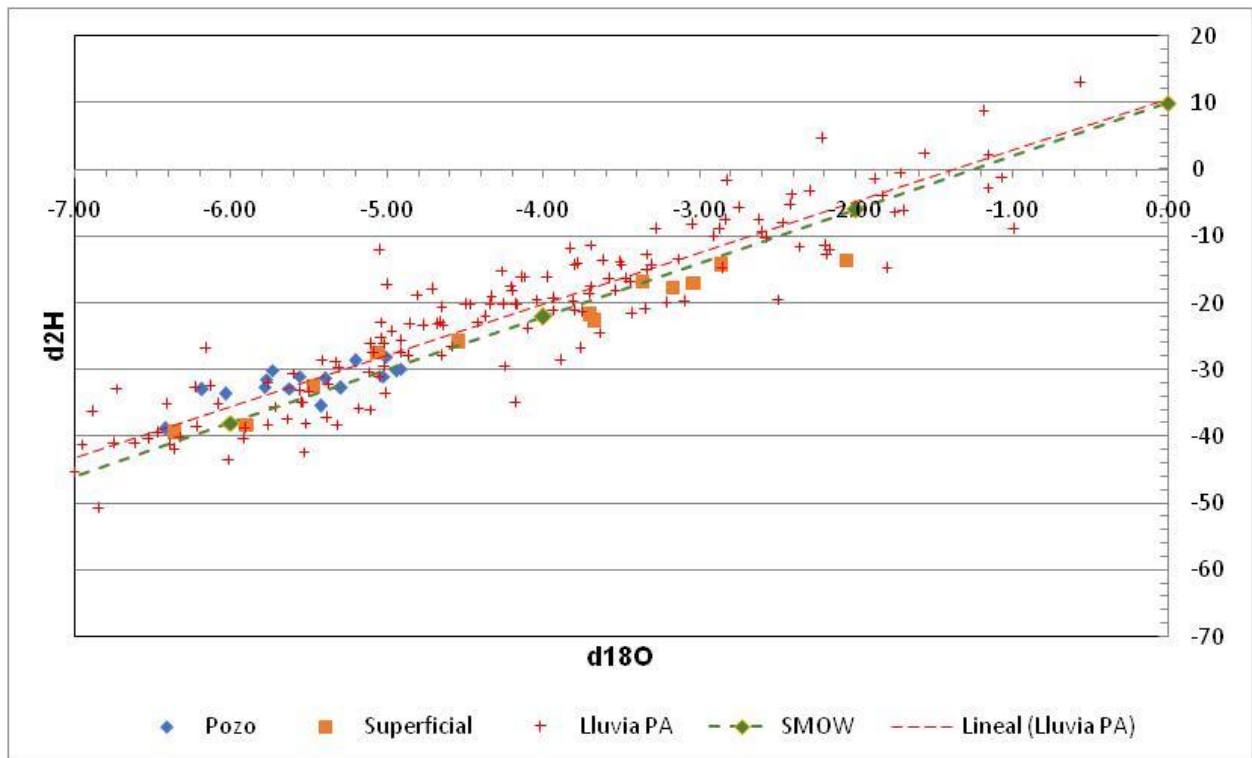


Figura 28. Isótopos de aguas subterráneas y superficiales

6.4. Mapa hidrogeológico

El mapa hidrogeológico expresa el resumen del conocimiento del acuífero y su funcionamiento, esto resulta de la acumulación de información procesada. En las Figuras 29 y 30 se expone el mapa hidrogeológico del área y un perfil esquemático del funcionamiento del acuífero.

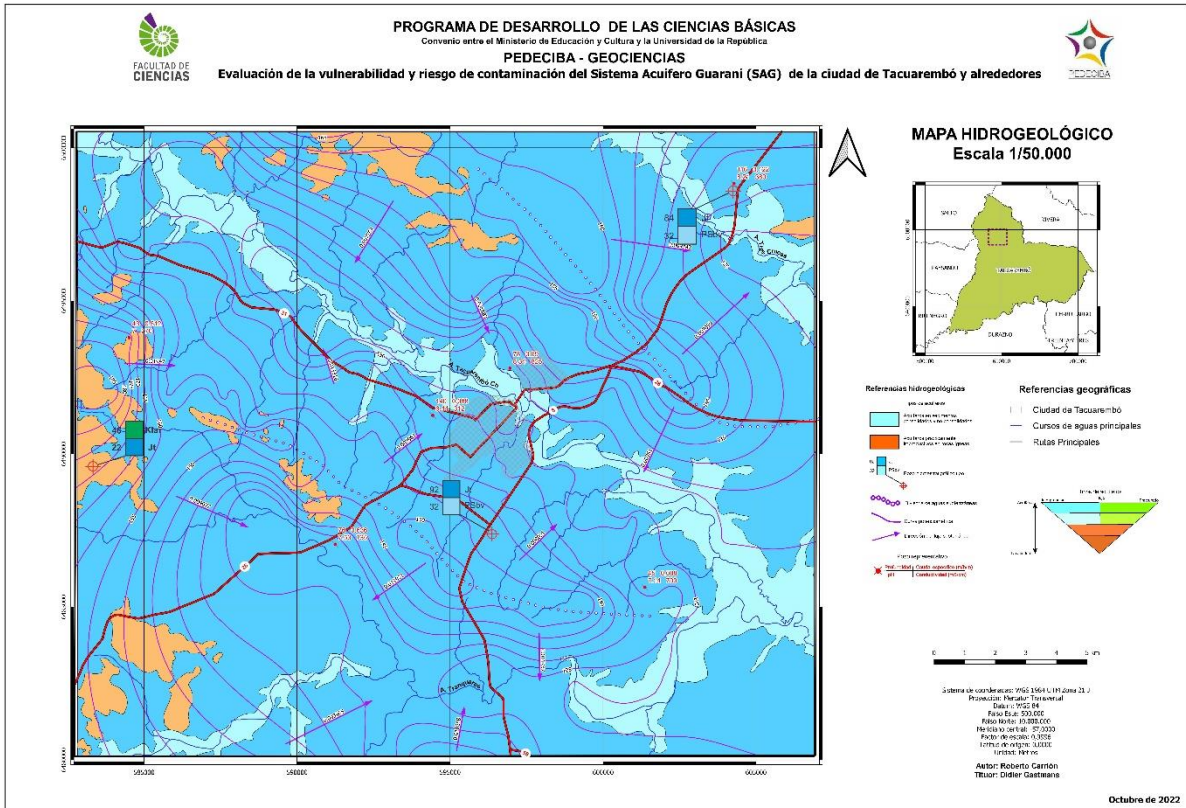


Figura 29. Mapa hidrogeológico (Link al mapa a escala original)

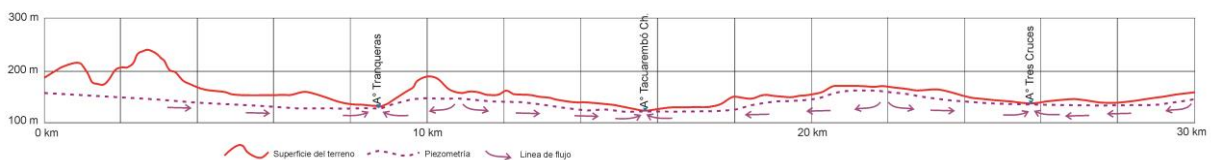


Figura 30. Modelo hidrogeológico conceptual

A partir de la interpretación de los datos e información de las perforaciones del área se tiene que el comportamiento del acuífero es libre a semi libre en la mayor parte del área,

pudiéndose considerar como confinado en las zonas en que está cubierto por rocas basálticas de la Formación Arapey.

El espesor de la Formación Tacuarembó, donde se puede incluir en parte los relictos de la Formación Rivera, está en el orden de 80-90 m (Ciudad de Tacuarembó), con un progresivo aumento de espesores hacia el Norte (ej. Bañado de Rocha).

Los antecedentes analizados indican que, la profundidad promedio de los pozos es de 54 ± 30 m y los caudales medios de 3.31 ± 2.83 m³/h. Los niveles estáticos tienen un promedio de 12.1 ± 8.0 m.

La interpretación de la piezometría indica un flujo del agua subterránea descargando a los cursos superficiales, A° Tacuarembó Chico, A° Tres Cruces y A° Tranqueras, principalmente.

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.

Los antecedentes analizados (Montaño, 2005) indican que las conductividades hidráulicas de las areniscas acuíferas tienen valores que varían desde 0.20 a 0.78 m/día y coeficiente de almacenamiento entre 1.8×10^{-2} a 4.5×10^{-3} .

El funcionamiento del sistema, con el ingreso del agua principalmente en las partes altas del terreno y su descarga en los cursos superficiales, puede confirmarse. El comportamiento del contenido de ¹⁸O, también lo confirma, ya que los cursos presentan valores similares a la de las perforaciones.

Por lo tanto, el modelo planteado se puede confirmar, no solo por la piezometría, sino que se apoya también en el estudio del comportamiento del ¹⁸O, que cual funciona en este caso como un trazador del escurrimiento subterráneo, evidenciando la interacción río – acuífero.

6.5. Vulnerabilidad del acuífero

6.5.1. Método GOD

Se presentan los elementos para la estimación de la vulnerabilidad por el método GOD.

G = tipo de acuífero

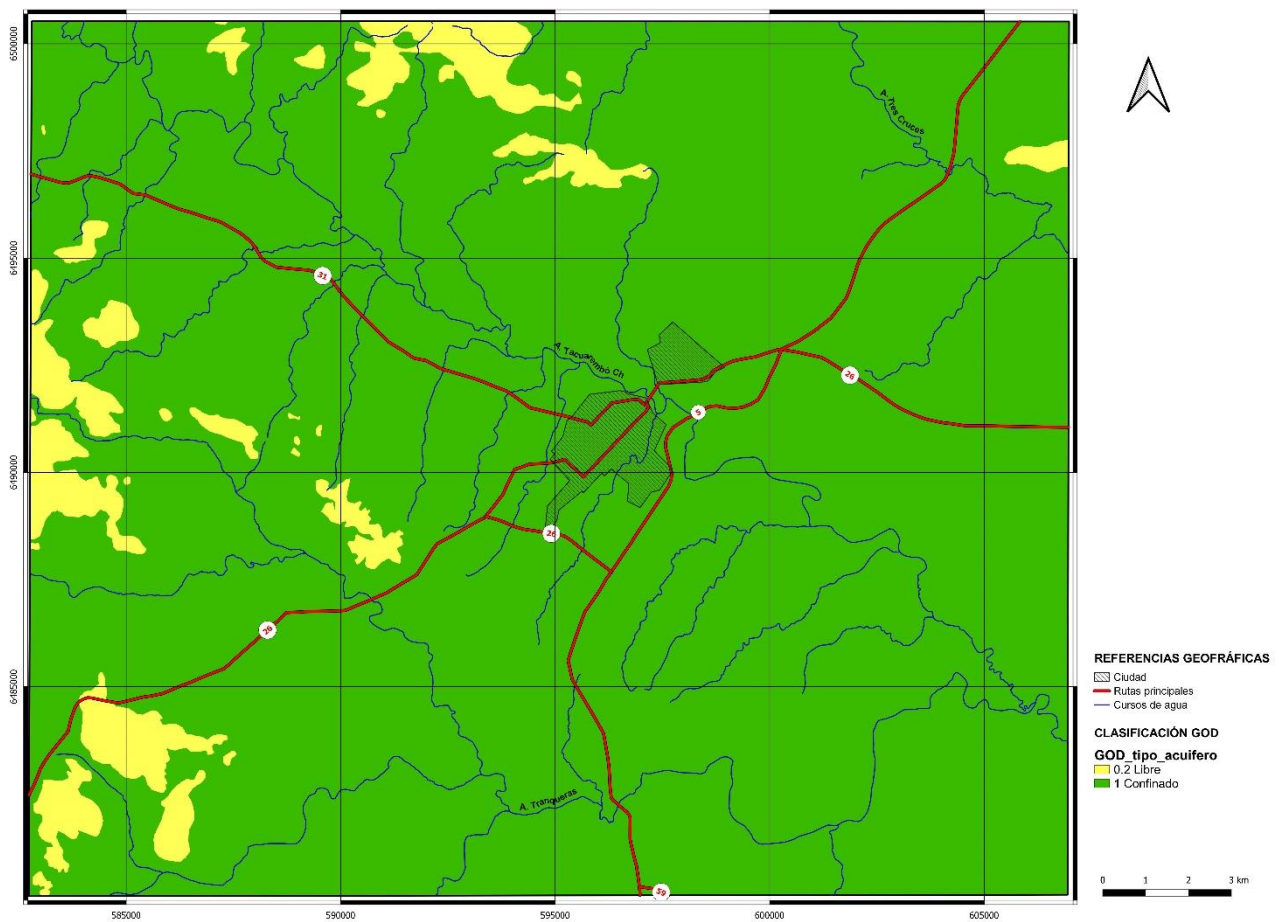


Figura 31. Mapa de confinamiento, según criterio GOD. El mismo surge de discriminar el área con cobertura basáltica con la que no presenta cobertura, considerando a esta última como confinada

O = litología de la zona no saturada

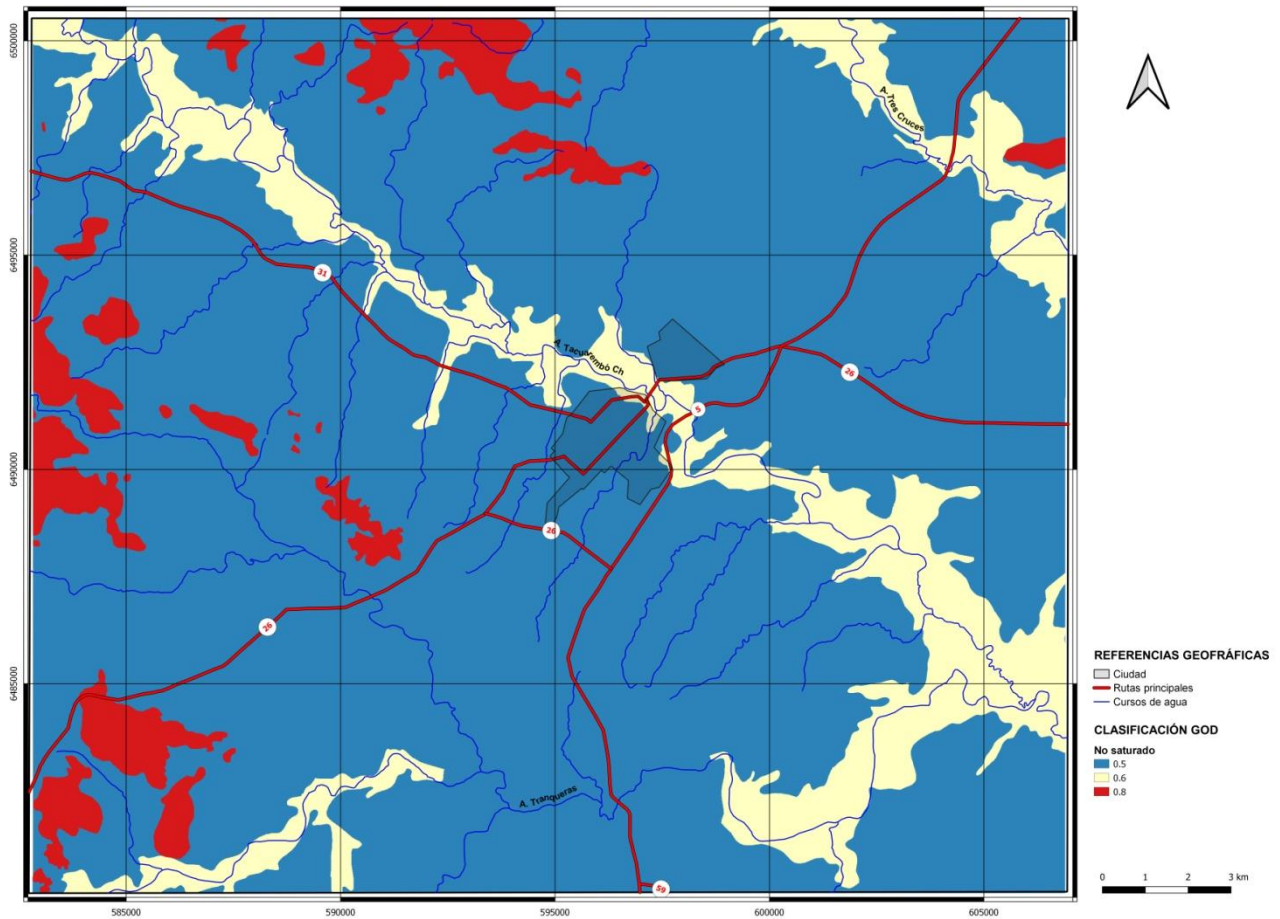


Figura 32. Mapa de zona no saturada, criterio GOD. El mismo presenta tres categorías, dependiendo de la litología. En la clasificación se tiene que los aluviones presentan una mayor saturación, que los sedimentos del acuífero y los basaltos.

D = Profundidad el agua

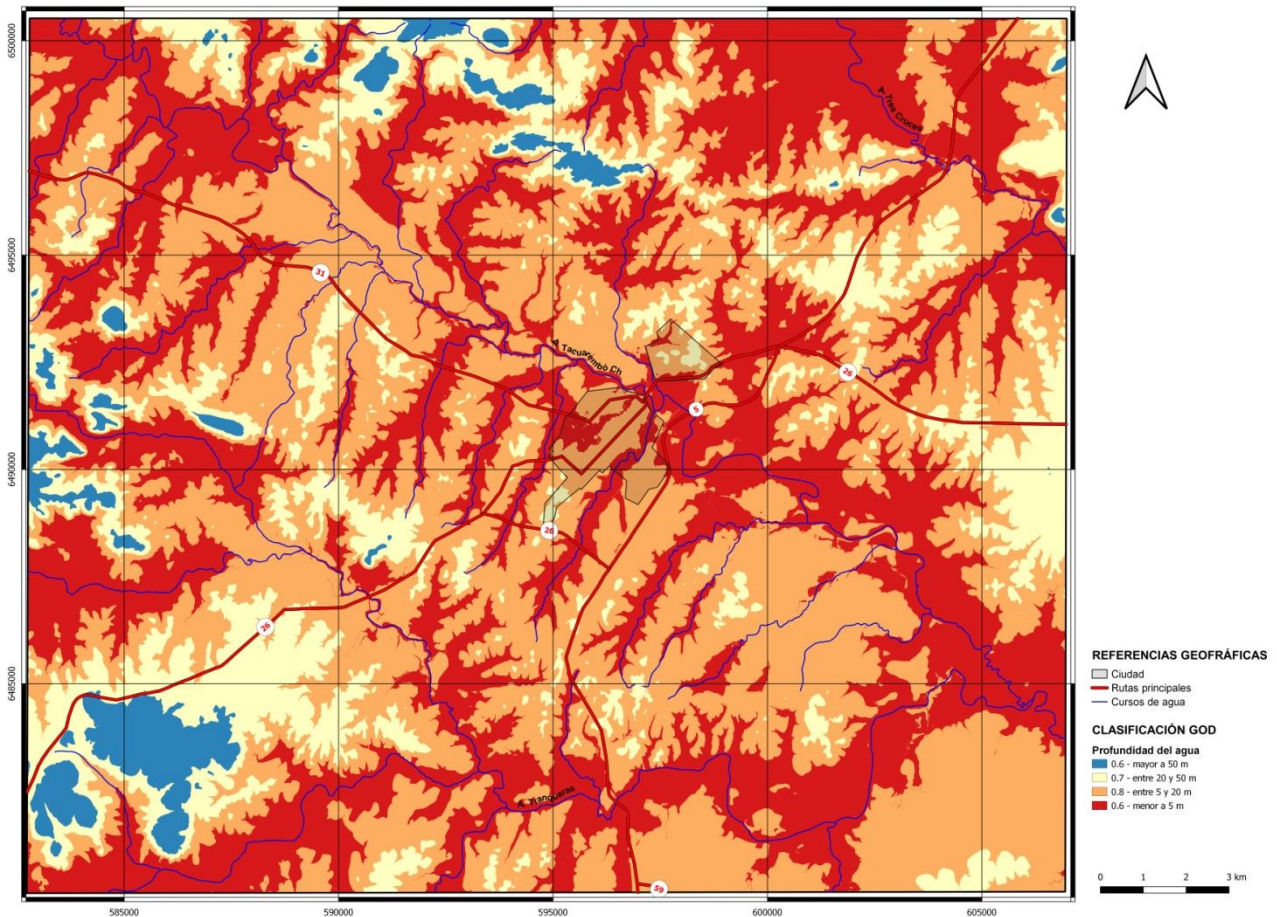


Figura 33. Mapa de profundidad del agua, según criterio GOD. Como se puede observar las mayores profundidades del agua se encuentra en las áreas confinadas y las de menor las zonas próximas a los cursos superficiales

Mapa GOD

A los efectos de dar una continuidad en el texto se presenta el mapa GOD (figura 34), el mismo puede ser visto en el mapa del Anexo a la escala original, el mismo resulta de la operación del producto de G, O y D con la utilización de los parámetros representados en las figuras 31, 32 y 33.

En el Tabla 12 se presentan las áreas y porcentajes de las mismas, según clasificación por el método en base a la vulnerabilidad. Como se aprecia el 56% de la superficie de estudio

presenta vulnerabilidad *media*, siguiéndole en orden decreciente de importancia vulnerabilidad *alta*.

Clasificación	Vulnerabilidad	Area km ²	%
0.1	Despreciable	0.01	0.00%
0.1- 0.3	Baja	96.02	19.55%
0.3 - 0.5	Media	275.79	56.16%
0.5 - 0.7	Alta	119.25	24.28%
0.7 - 1	Extrema	0.00	0.00%

Tabla 12. Área ocupada según vulnerabilidad GOD

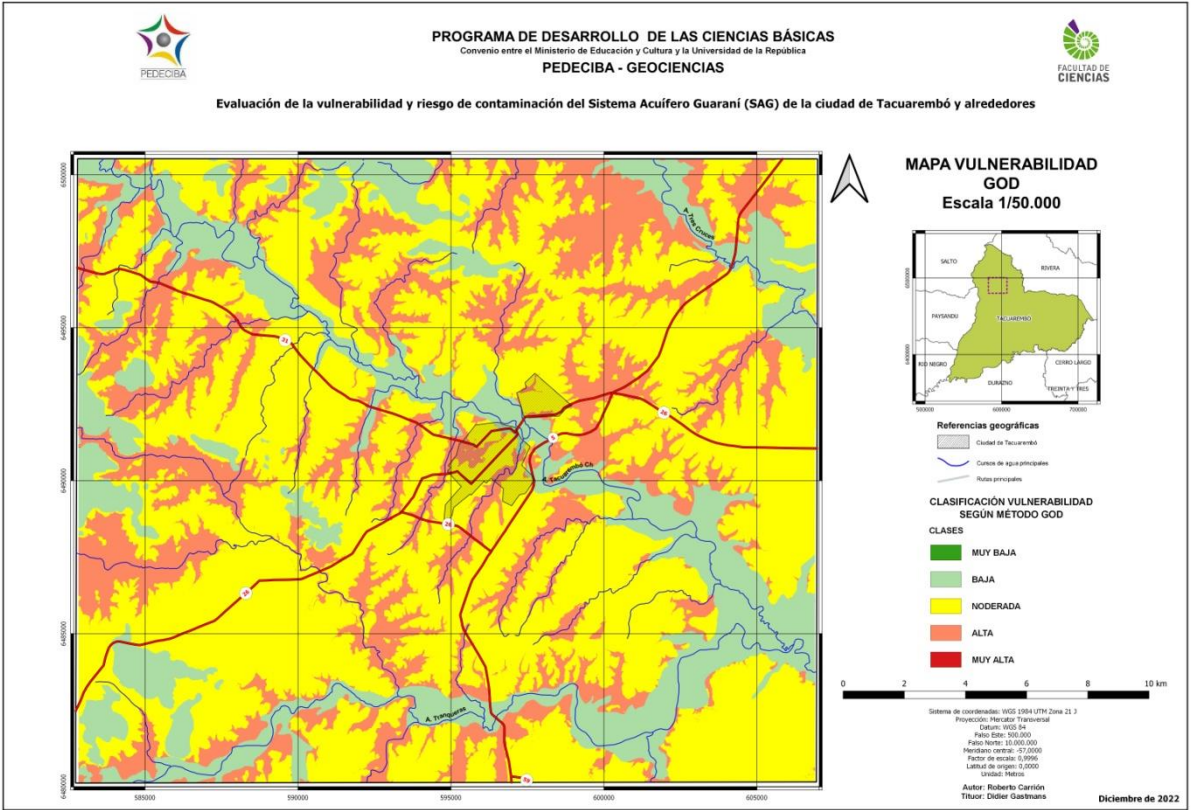


Figura 34. Mapa de vulnerabilidad según GOD (Link al mapa a escala original)

6.5.2. Método DRASTIC

Como se ha mencionado en la metodología DRASTIC, se deben confeccionar diferentes mapas con los parámetros que indica, y luego realizara una clasificación de la información de acuerdo a los criterios planteados. Los distintos mapas se pueden ver en las Figuras 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 41.

D = profundidad del agua

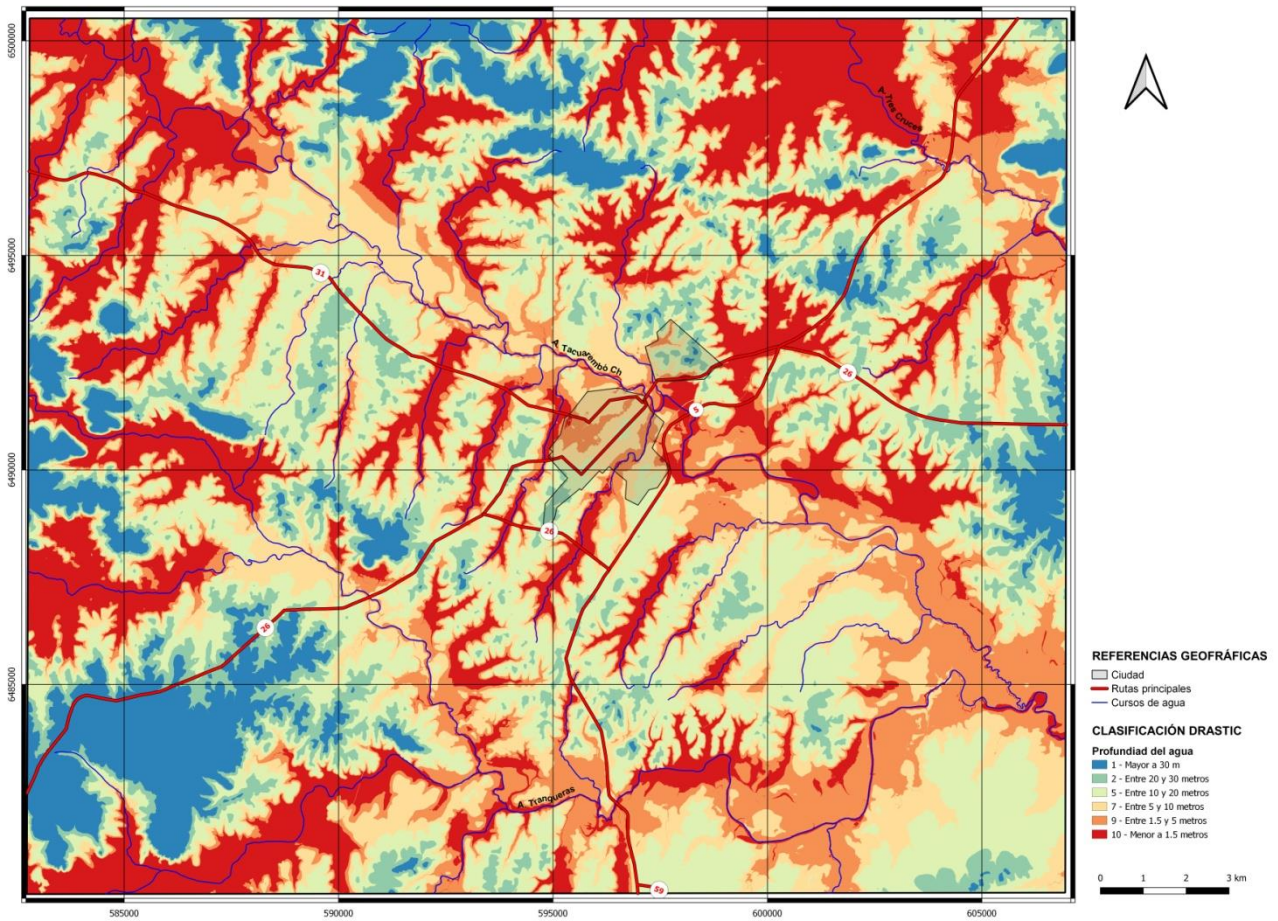


Figura 35. Mapa de profundidad del agua, criterio DRASTIC. Como en GOD se presentan las mayores profundidades del agua en la zona confinada, lo distinto es que este método presenta un mayor número de intervalos de clasificación

R = recarga neta

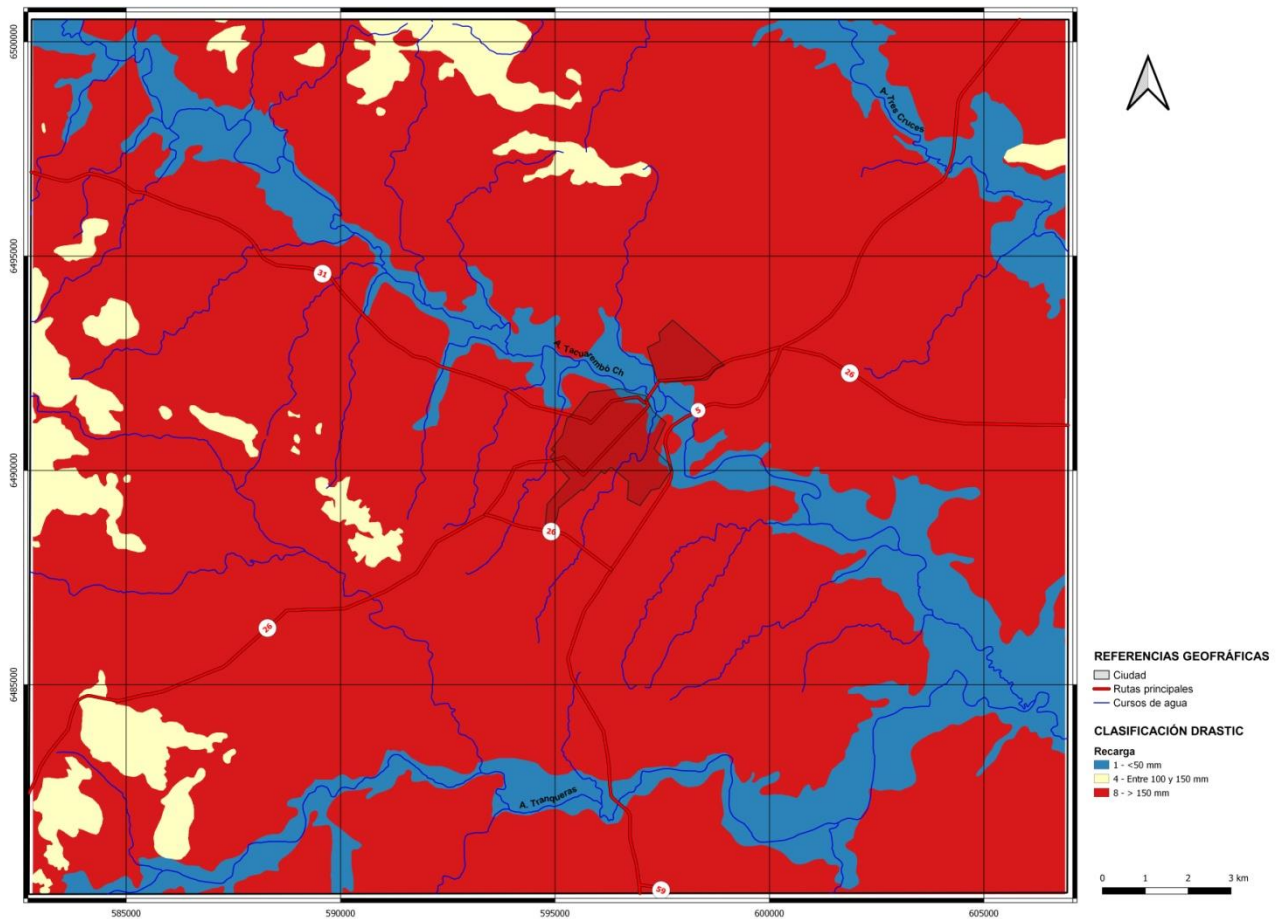


Figura 36. Mapa de recarga neta, criterio DRASTIC. En la recarga se supuso que la zona que abarcan los sedimentos recientes es menor debido a su naturaleza y a que la descarga del acuífero se da sobre esas áreas.

A = Litología del acuífero

Se presenta la clasificación de la litología a aplicar, según el criterio establecido en el método

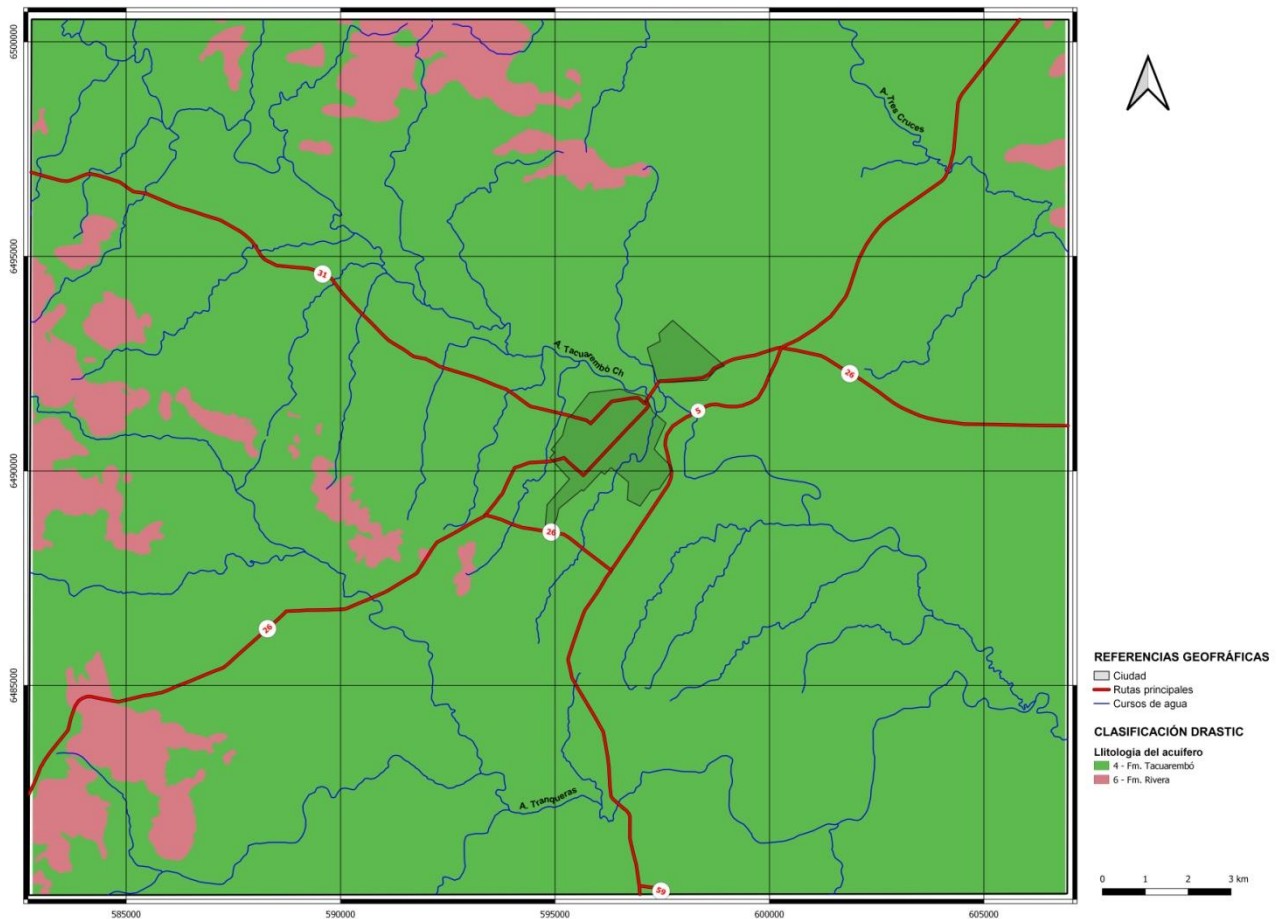


Figura 37. Mapa de litología del acuífero, según criterio DRASTIC. La misma se clasificó de acuerdo a lo que se expresa en el mapa geológico, asumiendo que por debajo de los basaltos se desarrolla la Formación Rivera.

S = Tipo de suelo

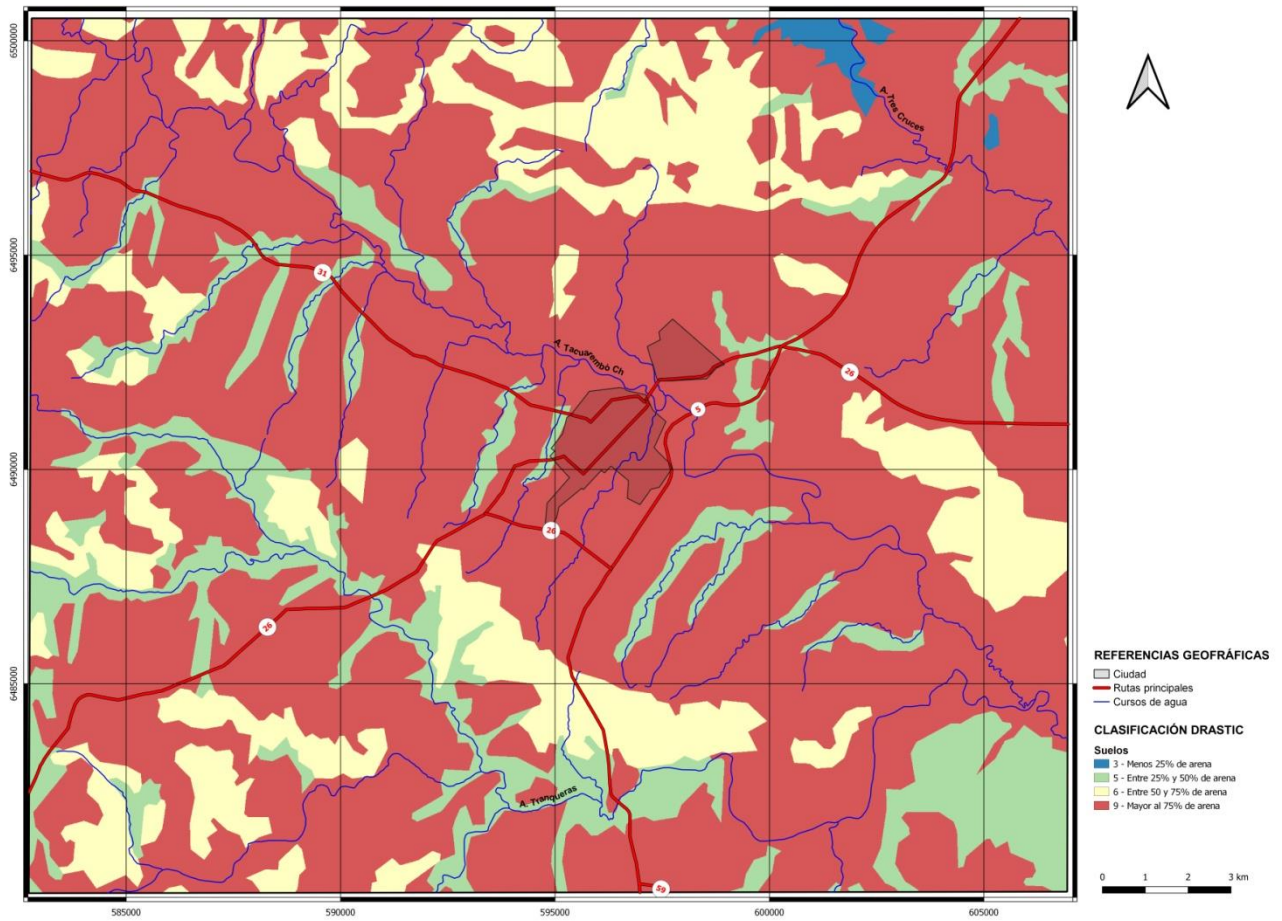


Figura 38. Mapa de suelos, criterio DRASTIC. El mismo surge de la interpretación del mapa de suelos obtenido del MGAP-DGRN, clasificándolos a partir del contenido de arena

T = Topografía

Aquí se tiene la clasificación según la metodología expresada anteriormente para la aplicación del método.

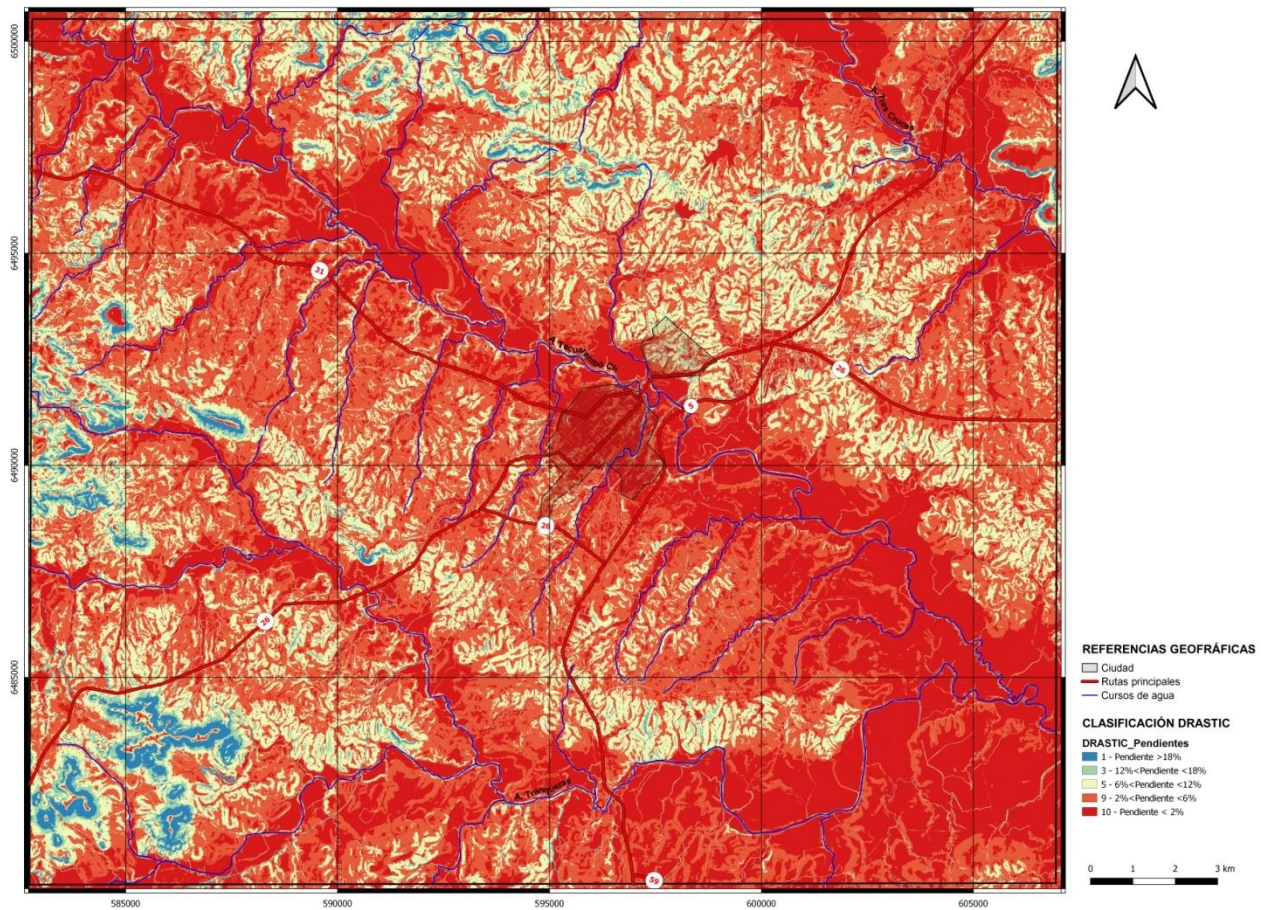


Figura 39. Mapa de topografía, según criterio DRASTIC. Este se obtiene a partir del MDT de IDE, utilizando el algoritmo de qGis para el cálculo de las pendientes.

I = Zona no saturada

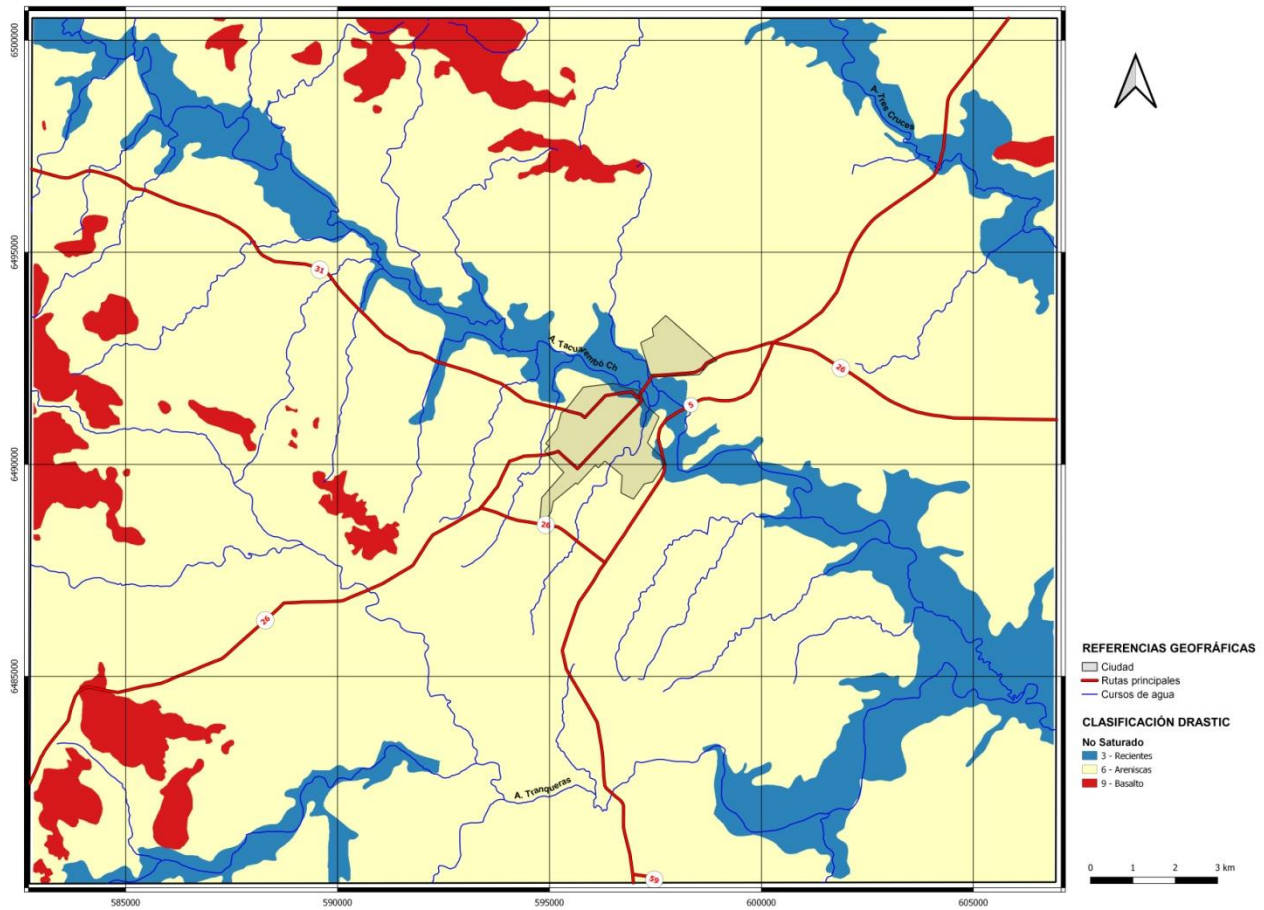


Figura 40. Mapa de zona no saturada, clasificado según criterio DRASTIC. El criterio de clasificación fue el mismo que para el GOD, pero asignándoles los valores que propone DRASTIC para su categorización.

C = Conductividad hidráulica del acuífero

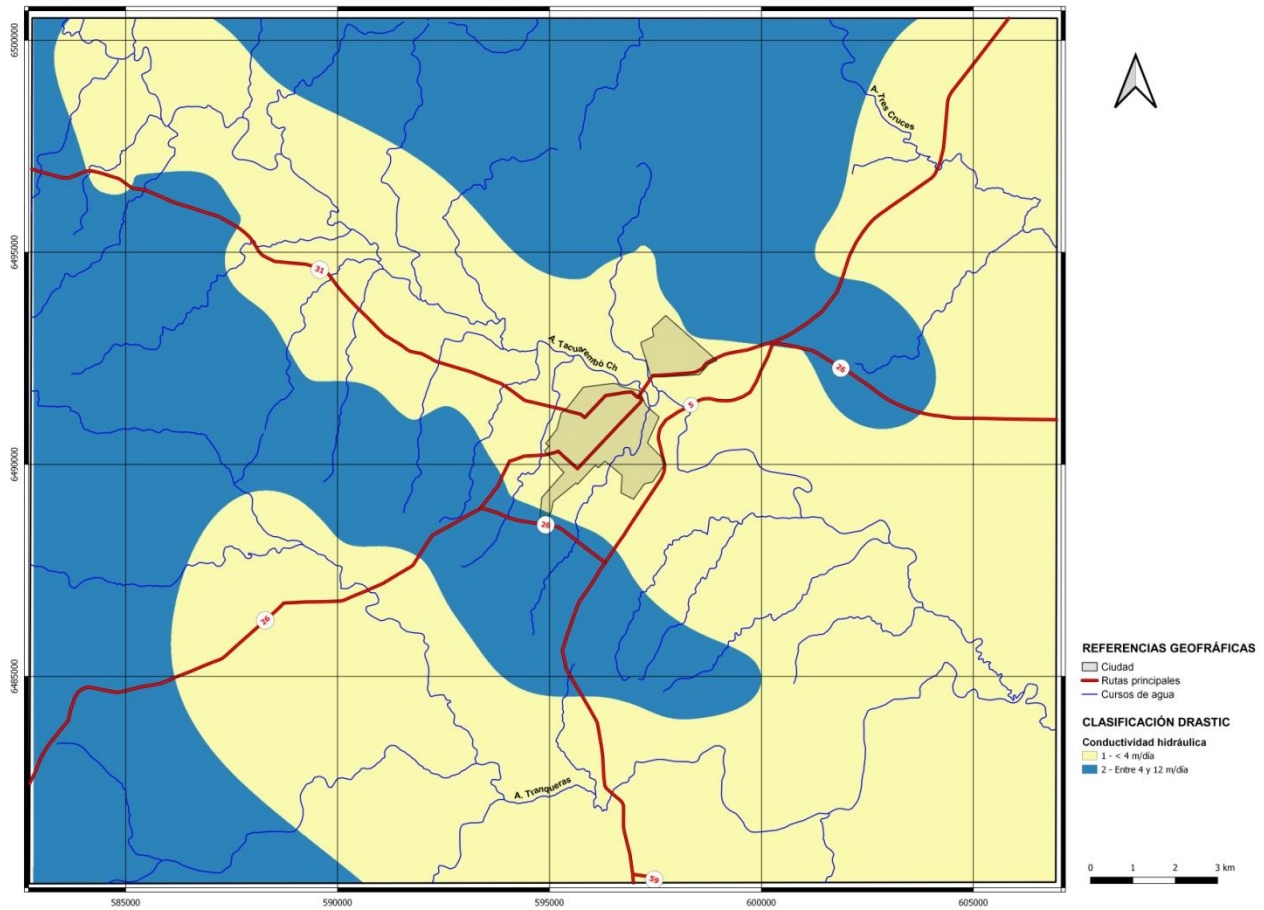


Figura 41. Mapa de conductividad hidráulica. El mismo surge de la propuesta realizada en la metodología suponiendo dos regiones que presentan conductividades distintas.

Mapa DRASTIC

Como forma de tener presente el mapa DRASTIC para una primera visualización, se presenta a una escala reducida (Figura 42), el mismo puede ser visto a la escala original en el Anexo.

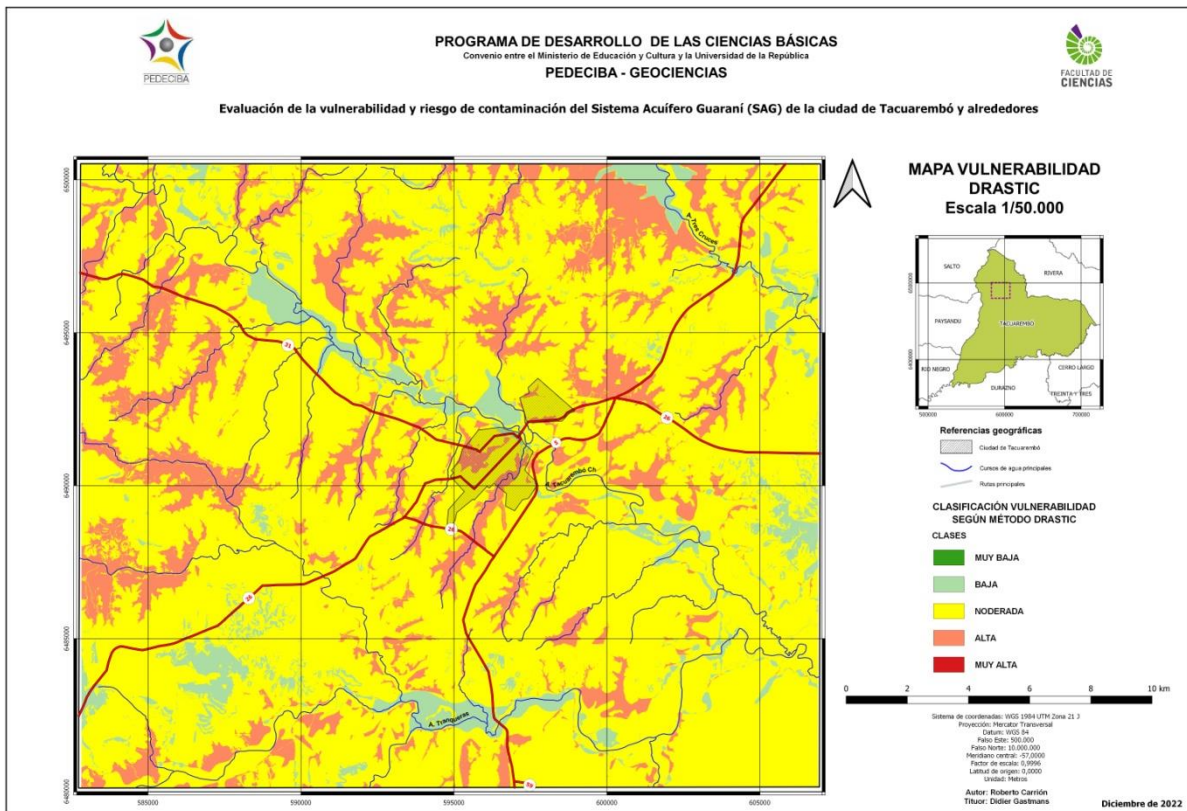


Figura 42. Mapa de vulnerabilidad del acuífero, según criterio DRASTIC (Link al mapa a escala original)

En la Tabla 13 se presentan las áreas y porcentajes de las mismas según como se clasifican por el método DRASTIC. Como se aprecia en la Tabla 13 y Figura 42, el 76% de la superficie de estudio presenta vulnerabilidad *moderada*, siguiéndole en orden decreciente de importancia vulnerabilidad *alta*.

DRASTIC		
	Clasificación	Área %
Muy Baja	23-64	0.01%
Baja	65-105	6.85%
Moderada	106-146	76.29%
Alta	147-187	16.85%
Muy Alta	188-230	0.00%

Tabla 13. Áreas ocupadas según clasificación DRASTIC

6.6. Riego de contaminación del acuífero

La confección de cartografía de riesgo debemos tener presente los mapas de amenazas y vulnerabilidad. Cada uno de los productos cartográficos que utilizamos en la elaboración del mapa de riesgo, son el resultado de índices e indicadores específicos.

A partir del Mapa del uso del suelo del Ministerio de Ganadería y Agricultura del año 2021 (Figura 43), se ha realizado una clasificación de los usos según su importancia:

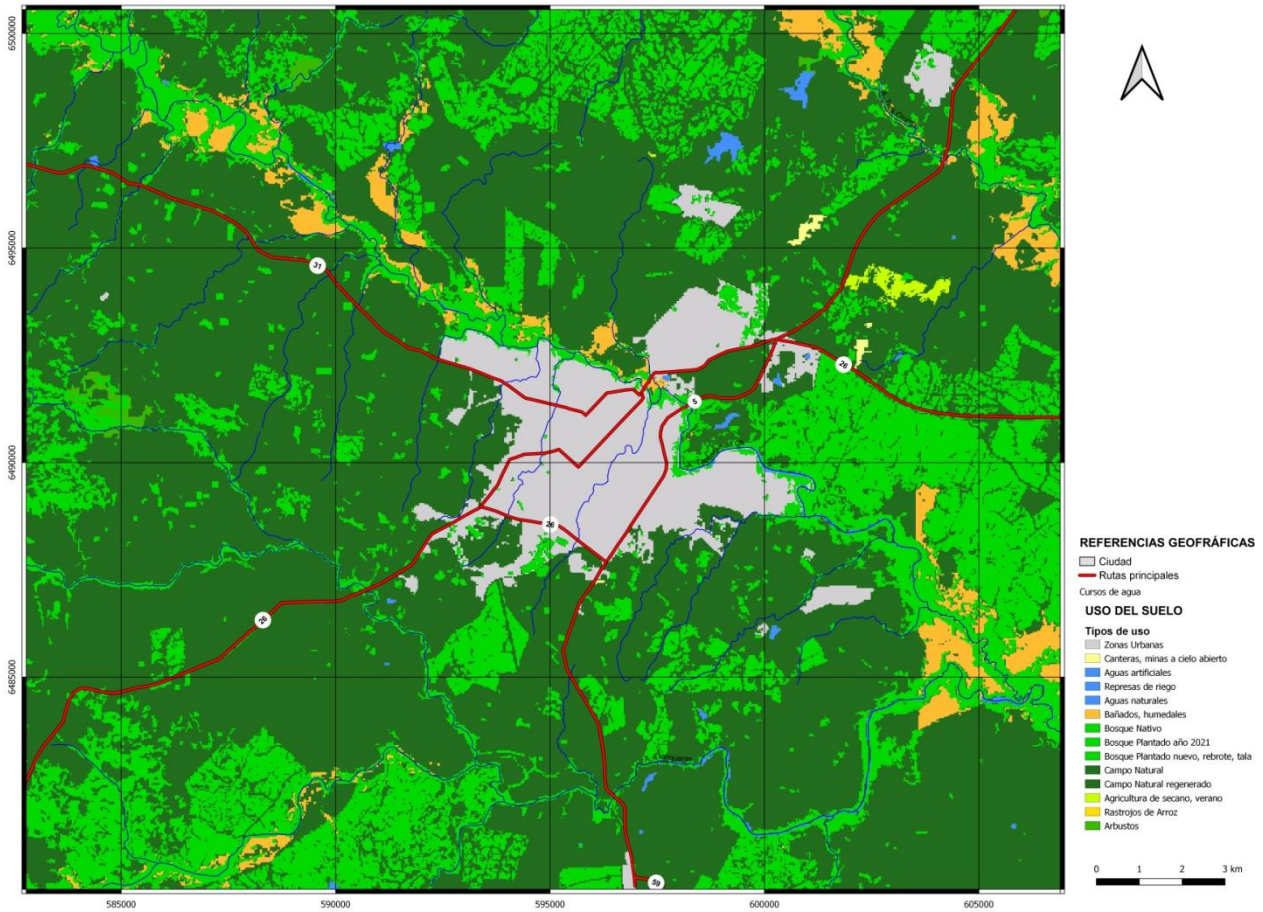


Figura 43. Mapa de usos del suelo

Con la información del Ministerio de Ambiente, OSE y recorridas de campo se confeccionó el mapa de fuentes puntuales, representadas en la Figura 44.

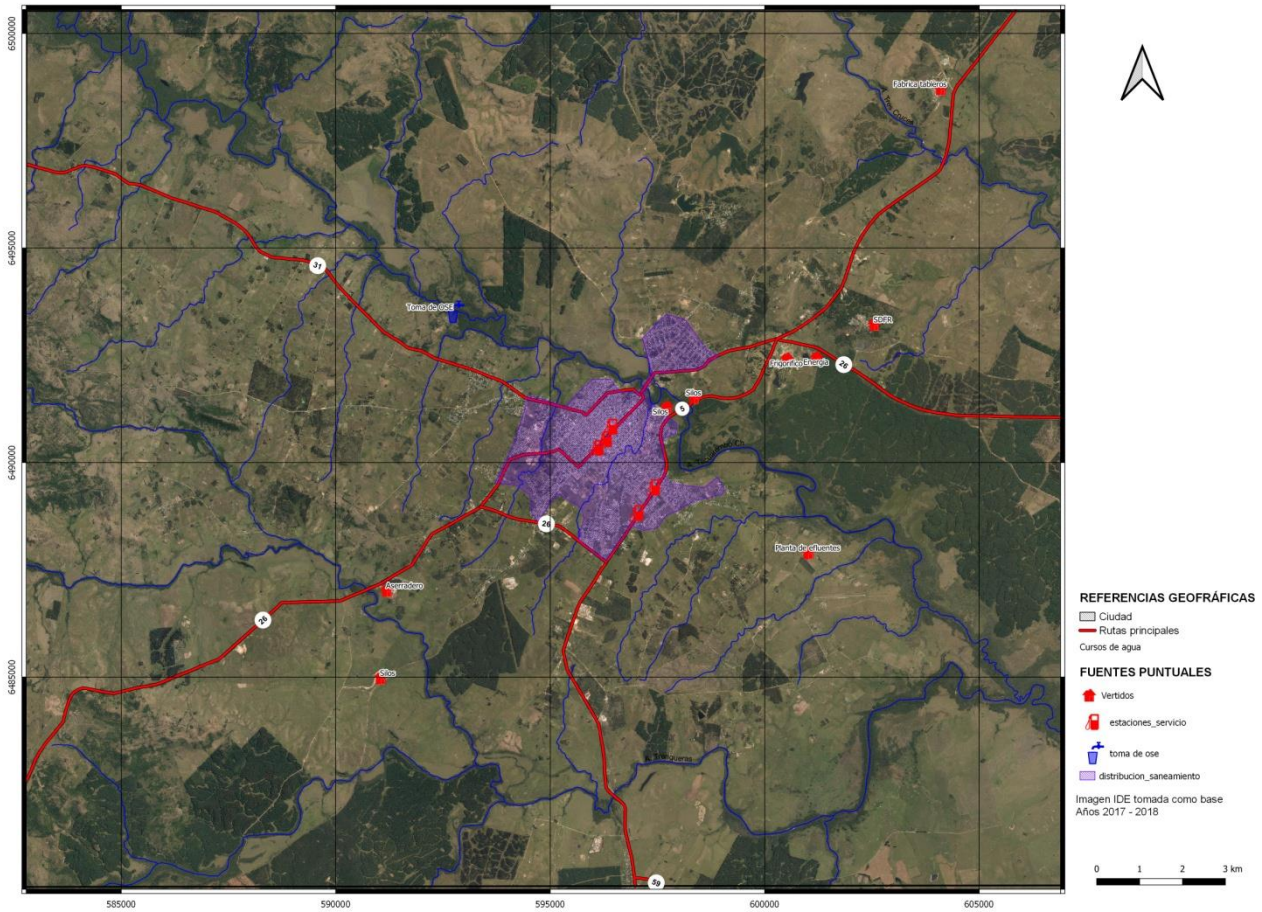


Figura 44 Mapa fuentes puntuales de contaminación

Aplicando la propuesta de Stigter, et al (2006), se realizó la clasificación de suelos según su peligrosidad, para luego calcular el Índice de Susceptibilidad, que lo hemos tomado como una aproximación al ingreso de contaminantes al acuífero.

En la Figura 45 se presenta el resultado final de la superposición de los mapas de Índice de Susceptibilidad y de Fuentes Puntuales y en la Tabla 14 las áreas que ocupa cada índice.

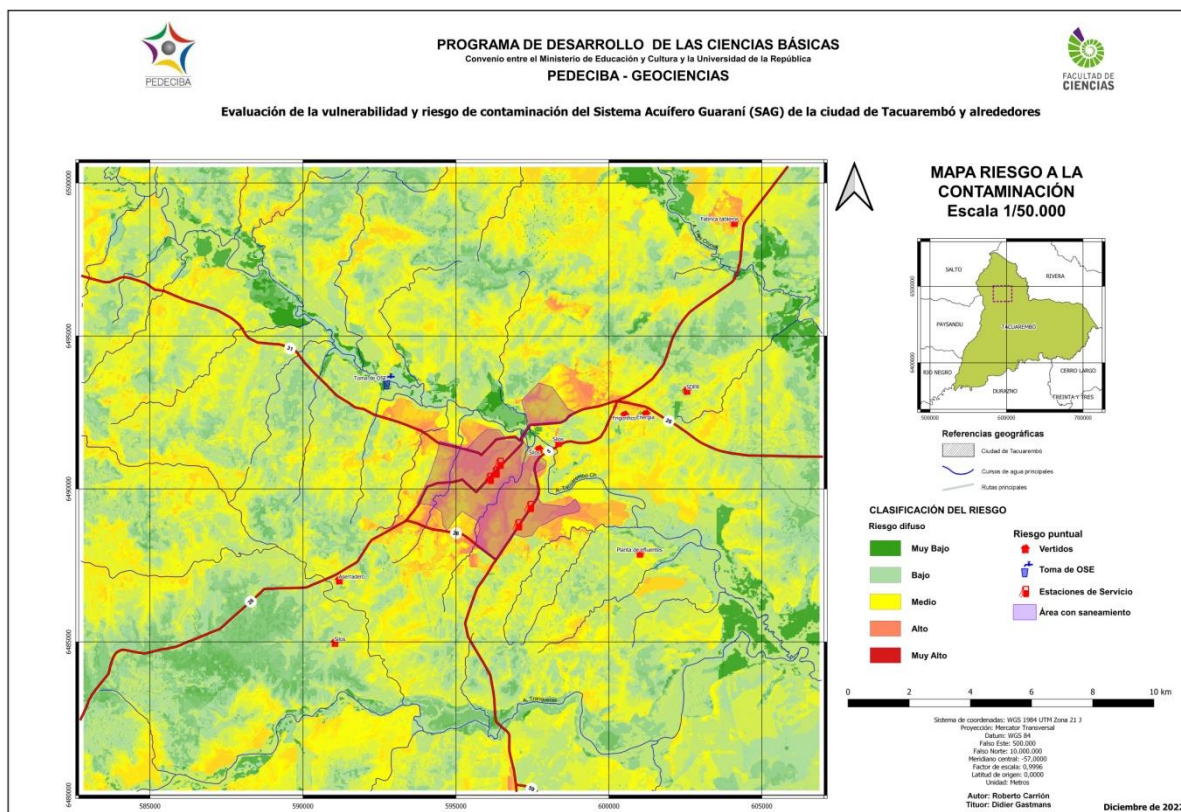


Figura 45. Mapa riesgo de contaminación (Link al mapa a escala original)

Clasificación	Puntaje	%
Muy bajo	< 5	3%
Bajo	5 - 10	14%
Medio	10 - 15	57%
Alto	15 - 20	20%
Muy alto	> 20	6%

Tabla 14. Área según el riesgo de contaminación

7. Discusión

La aplicación de los métodos de evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación, hacen necesario conceptualizar un modelo del sistema acuífero que se está estudiando.

En nuestro caso el modelo propuesto muestra que, en el área de afloramiento del SAG, la recarga del mismo se da en forma directa y la descarga se produce hacia la red de drenaje. Los principales controles son el relieve y los elementos morfo - estructurales, definiendo una componente general de dirección de flujo subterráneo hacia el Este – Sureste. Esto no es concordante con el flujo a nivel regional del acuífero.

Esta conceptualización del modelo hidráulico se apoya en los resultados e interpretación de la piezometría, como en la aplicación de isótopos naturales estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$.

Este modelo conceptual nos indica que el flujo en las proximidades de los cursos de agua es ascendente, por lo que son zona a considerar de menor vulnerabilidad o riesgo, mientras que las zonas elevadas, donde se genera la recarga, deberían de ser consideradas a la hora de implantar emprendimientos con potencial de emitir sustancias contaminantes que puedan ingresar al sistema.

Las metodologías GOD y DRASTIC para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero en el área dependen de la información de base que se disponga para su uso 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.

La Tabla 15 compara ambos métodos de clasificación de la vulnerabilidad del acuífero. Allí se puede observar que el método GOD es más restrictivo que DRASTIC. El primero le asigna más área a la vulnerabilidad **alta** que el segundo, mientras que en **moderada** DRASTIC considera una mayor área que GOD.

Vulnerabilidad	GOD	DRASTIC
Muy baja	0.00%	0.01%
Baja	19.55%	6.85%
Moderada	56.16%	76.29%
Alta	24.28%	16.85%
Muy alta	0.00%	0.00%

Tabla 15. Comparación de la vulnerabilidad según GOD y DRASTIC

No obstante, si tomamos en cuenta las vulnerabilidades **moderada** y **alta** de ambos métodos, GOD es menos restrictivo que DRASTIC, ya que el primero abarca el 80% del área, y el segundo 93%.

Es importante tener presente la forma en que pueden variar los modelos aplicados para la determinación de la vulnerabilidad, debido a los parámetros que utiliza cada uno de ellos.

GOD utiliza dos parámetros que son firmes y que dependen de la geología, estos son el grado de confinamiento y la litología del acuífero, mientras que la distancia al agua (D) puede variar a lo largo del tiempo. Este último punto no fue posible evaluarlo en este trabajo ya que no se tenía información respecto a la variación de los niveles estáticos de las perforaciones a lo largo del tiempo.

DRASTIC presenta parámetros firmes como la litología, el tipo de suelos, la topografía y conductividad hidráulica, mientras que la profundidad del agua, la recarga y la zona vadosa pueden variar a lo largo del tiempo. Como fue mencionado para GOD no es posible tener variaciones en el nivel estático de los pozos que nos permita obtener una variación en la profundidad del agua y por ende la zona vadosa, sin embargo, si podemos realizar una evaluación de las variaciones de la vulnerabilidad con las variaciones de la recarga.

La respuesta del método DRASTIC a cambios en la recarga se evaluó en función del régimen de lluvias. Para ello, se ha aplicado el método para eventos extremos de lluvia, y por ende de recarga, y para la lluvia promedio para el área.

El resultado obtenido se muestra en la Tabla 16 y Figura 46, donde se presentan los valores obtenidos en el modelo para recarga mínima, promedio y máxima.

	Mínima	Promedio	Máxima
Muy Baja	0.01%	0.01%	0.01%
Baja	28.66%	6.85%	4.87%
Moderada	71.30%	76.29%	74.06%
Alta	0.04%	16.85%	21.07%
Muy Alta	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 16. Variación de la clasificación DRASTIC según la recarga

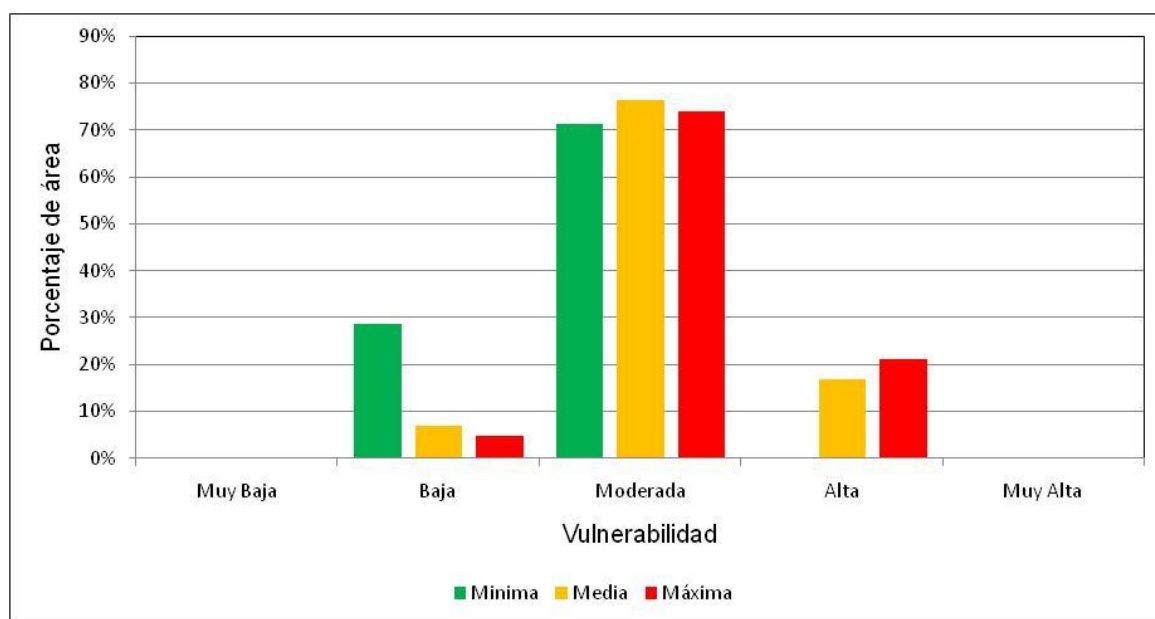


Figura 46 Variación de la clasificación DRASTIC según la recarga

La aplicación de la variación de este parámetro nos muestra que según sea el régimen pluviométrico y por lo tanto la recarga, el método presenta variaciones en la determinación de la vulnerabilidad. Resulta de suma importancia tener presente la fuerza de los parámetros utilizados en el método, así como la disponibilidad de los mismos.

Los criterios utilizados para la obtención del riesgo de contaminación del acuífero son lo suficientemente contundentes a la hora de la evaluación del riesgo. Sin perjuicio de ello, es

posible mejores ajustes en dicha evaluación, como por ejemplo la utilización de productos químicos en los plantíos a partir del uso del suelo y además el uso a lo largo del tiempo.

El riesgo de la forma que fue evaluado presenta alguna debilidad ya que el mismo puede variar con la implantación de nuevos emprendimientos industriales o de servicios y la variación de los cultivos que dependen fuertemente de los valores de mercado.

No obstante, se tiene que casi el 50% del área es ocupada por campo natural el cual es posible que siga en la misma condición. La agricultura ocupa un área reducida, salvo en lo referente a la forestación que ocupa un 20%.

8. Conclusiones

El Sistema Acuífero Guaraní se comporta en el área de estudio como libre a semi confinado, salvo pequeñas áreas en las que las areniscas están cubiertas por rocas basálticas en las que se presenta como confinado.

El modelo conceptual propuesto nos indica que el flujo presenta en general dirección Oeste – Este, con descarga a los cursos de aguas superficiales. Esto indica que son un control de la descarga del acuífero y, por lo tanto, en las proximidades de estos el flujo es ascendente, siendo zonas de menor vulnerabilidad o riesgo. Mientras tanto, las zonas elevadas donde se genera la recarga deberían ser consideradas a la hora de implantar emprendimientos.

El agua del acuífero no presenta riesgo para el consumo humano ni para el uso agropecuario, teniendo en cuenta los parámetros físicos – químicos estudiados en este trabajo.

El área exhibe una vulnerabilidad media o moderada (según el método aplicado), las que pueden ser tomadas como equivalentes. Toda actividad antropogénica que se realice en la región, debe tener presente las características del acuífero.

El riesgo de contaminación del acuífero, principalmente vinculado al uso agrícola y ganadero en la zona debe considerarse en la planificación de la producción.

Un punto de importancia es el sitio de disposición final de residuos domésticos que se enclava en una zona de recarga del acuífero. Sería de gran importancia el monitoreo del agua subterránea desde el punto de vista de la calidad en su entorno.

Se entiende que es de gran utilidad para el ordenamiento del territorio de la ciudad de Tacuarembó y alrededores, los conocimientos obtenidos en este trabajo, ya que del mismo se pueden extraer y definir zonas de protección en la elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial.

9. Bibliografía

- Albinet, M., Margat, J. (1970). Groundwater Pollution Vulnerability Mapping. Bulletin du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres Bull BRGM 2nd Series, 3 : 13-22
- Aller L., Ennet T, Leher J.H., Petty, R., Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings United States Environmental Protection Agency, EPA, Oklahoma. EPA/600/2-87-035, 622 p.
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.4: 85-103
- Bidegain, M., Caffera, R., Depto. De Meteorología, Facultad de Ciencias, UDELAR
(https://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/Uy_c-info.htm)
- 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 Geoeditores SRL, Montevideo (CD-ROM)
- Bossi, J., Schipilov, A. (2005). Rocas Ígneas Básicas del Uruguay, Departamento de Suelos y Aguas, Cátedra de Geología, Facultad de Agronomía, UDELAR.
- Carrión, R. (1991). Hidrogeología en torno a la ciudad de Tacuarembó. Tesis de grado Geología, Facultad de Ciencias
- Colins, J., Sashikkumar, M.C, Anas, P.A., Kirubakaran, M. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos basada en SIG utilizando el modelo DRASTIC: un estudio de caso sobre la cuenca de Kodaganar. Revista de investigación en Ciencias de la Tierra 20 (1), H1-H8. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v20n1.52469>
- Collazo P., 2006. Investigación hidrogeológica de acuífero guaraní en el área aflorante de los departamentos de Rivera y Tacuarembó. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
- Collazo P., Auge M., Montañó J. 2007. Vulnerabilidad y Riesgo hidrogeológico del SAG en el área aflorante de Rivera – Uruguay. Acuífero Guaraní: avances en el conocimiento para su gestión sustentable. Revista Latino- Americana de Hidrogeología (ALHSUD), 157-173.
- CPRM – DINAGUA, 2015. Carta Hidrogeológica de la Cuenca de Cuareim, escala 1: 250.000. Equipo: Brasil: Diniz J.A., Machado J., Kirchheim R., da Silva R., de Paula T.L., Uruguay: Manganelli A., Techera J., Lacués X. https://www.gub.uy_mapa_hidrogeologico_de_la_Cuenca_del_Cuareim.pdf.
- Custodio, E y Llamas, M., 1983. Hidrología Subterránea, Ediciones OMEGA – Barcelona – España. Segunda edición corregida.
- Chebataroff, J. (1951-1952). Las regiones naturales de Rio Grande del Sur y de la República Oriental del Uruguay. Revista Geográfica, T. 11/12, No. 31/36, pp. 59-95. Pan American Institute of Geography and History
- Féraud G, Bertrand H, Martínez M, Ures C, Schipilov A & Bossi J (1999): *⁴⁰Ar/³⁹Ar age and geochemistry of the southern extension of Paraná traps in Uruguay*. Actas II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Córdoba, pp. 57-59.
- Foster and R. Hirata, 1988, "Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data," Pan Ame. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Scien. (CEPIS) Lima, pp. 81.
- 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, EEUU, <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.

Giménez, A., Castaño, J., Baethgen, W. y Lanfranco, B. 2009, Cambio Climático en Uruguay, Posibles Impactos e Medidas de Adaptación en el Sector Agropecuario, Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, ISBN:978-9974-38-275-6

Haertle, A. 1983, "Method of Working and Employment of EDP during the Preparation of Groundwater Vulnerability Maps," International Association of Hydrogeological Sciences, 142, pp. 1073-1085

Heinzen W., Carrión R., Massa E., Pena S., Stapff M., 2003. Mapa Hidrogeológico del Uruguay 1/1.000.00. Dirección Nacional de Minería y Geología (Ministerio de Industria, Energía y Minería, Uruguay). <http://www.dinamige.gub.uy/ch25.htm>.

IGME, 2002, Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones. Madrid, Ed. W.G. Mook)

IAEA/WMO Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <https://nucleus.iaea.org/wiser>

INIA – GRAS (2022), Base de datos agroclimáticos y balance hídrico (<http://www.inia.uy/gras>)

Intendencia de Tacuarembó – Dirección de Ordenamiento Territorial y Planeamiento Urbano (2012), Plan Local de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible de la Micro Región de la Ciudad de Tacuarembó

INUMET (2022), Clasificación climática. Disponible en:

<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/clasificacion-climatica>

IPT, 1980a. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. "Reconhecimento hidrogeológico do aquífero Tacuarembó, entre Paysandu e Bella Union, República Oriental del Uruguay", Relatório N°14.364.

LEBAC, 2008. Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Aquífero Guaraní. Coord.: Gastmans D., Chang H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guaraní. Rio Claro, 172 p. OEA, 2009. Aquífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações/ Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Acción - Edición español / portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.

Manzano, M., Guimarães M., 2008. Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní. Informe realizado para el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní a través del consorcio de empresas Tahal Consulting Engineers, SEINCO S.R.L. Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A. e Hidroambiente S.A. 223 p.

Mariño, E., García, R.(2018). Aplicaciones ambientales de al hidrogeoquímica. Universidad Nacional de La Pampa – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. (<https://www.cohife.org/advf/documentos/2019/09/5d6eebe415ac8.pdf>)

MGAP 2021, Actualización de Cobertura y Uso del Suelo del Uruguay al año 2020/2021. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/actualizacion-cobertura-uso-del-suelo-del-uruguay-ano-20202021>

Montaño M., 2005 Estudio Hidrogeológico del sistema acuífero guaraní en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó. Trabajo Final de grado Licenciatura en Geología, UDELAR.

Montaño J., Carrión R., 1990. Optimización de la explotación del Sistema Acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó – Buena Vista. Revista ABAS SUPLEMENTO - Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 1990.

OPP, (2022) Tacuarembó - Observatorio Territorio Uruguay, <https://otu.opp.gub.uy/perfiles/pdf?title=Tacuaremb%C3%B3>

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.

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

Pochintesta L., 2018. Importancia del conocimiento del medio físico en el ordenamiento territorial: estudio de caso Ciudad de Tacuarembó y alrededores, Tesis de grado Geología, Facultad de Ciencias, 164 p. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/21415?mode=full>

Renda, E. et al (2017). Manual para la elaboración de mapas de riesgo. Buenos Aires: Programa Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD ; Argentina: Ministerio de Seguridad de la Nación. ISBN 978-987-1560-75-2. Disponible en:

<https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/Manual-elaboracion-mapas-riesgo.pdf>

Santa Ana Alvarez, H. (2004). Análise Tectono-Estratigráfica das Seqüências Permtriássica e Jurocretácea da Bacia Chacoparanense Uruguiaia (“Cuenca Norte”), Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Oliveira, E. (2016), Hidrogeologia Ambiental: Contaminação de Solo e Águas Subterrâneas / Everton de Oliveira, São Paulo, SP, Brasil

Samuel Lunardi, William Fernando de Borba, Jean Favaretto, Marcelle Martins, Henrique Baldi Faccenda, Contamination susceptibility of Serra Geral Aquifer at municipal scale in Brazil, *Social Sciences & Humanities Open*, Volume 4, Issue 1, 2021, 100144, ISSN 2590-2911, <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2021.100144>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590291121000401>

Stigter, Y., Ribeiro, L. y Carvalho Dill, A. (2006), Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with ground water salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*.

DOI: 10.1007/s10040-004-0396-3

TAHAL,(1986). Proyecto agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos. Tahal Consulting Engineers, VERNON - ROU.

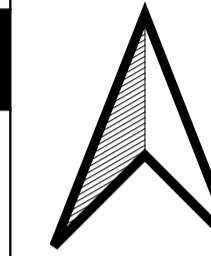
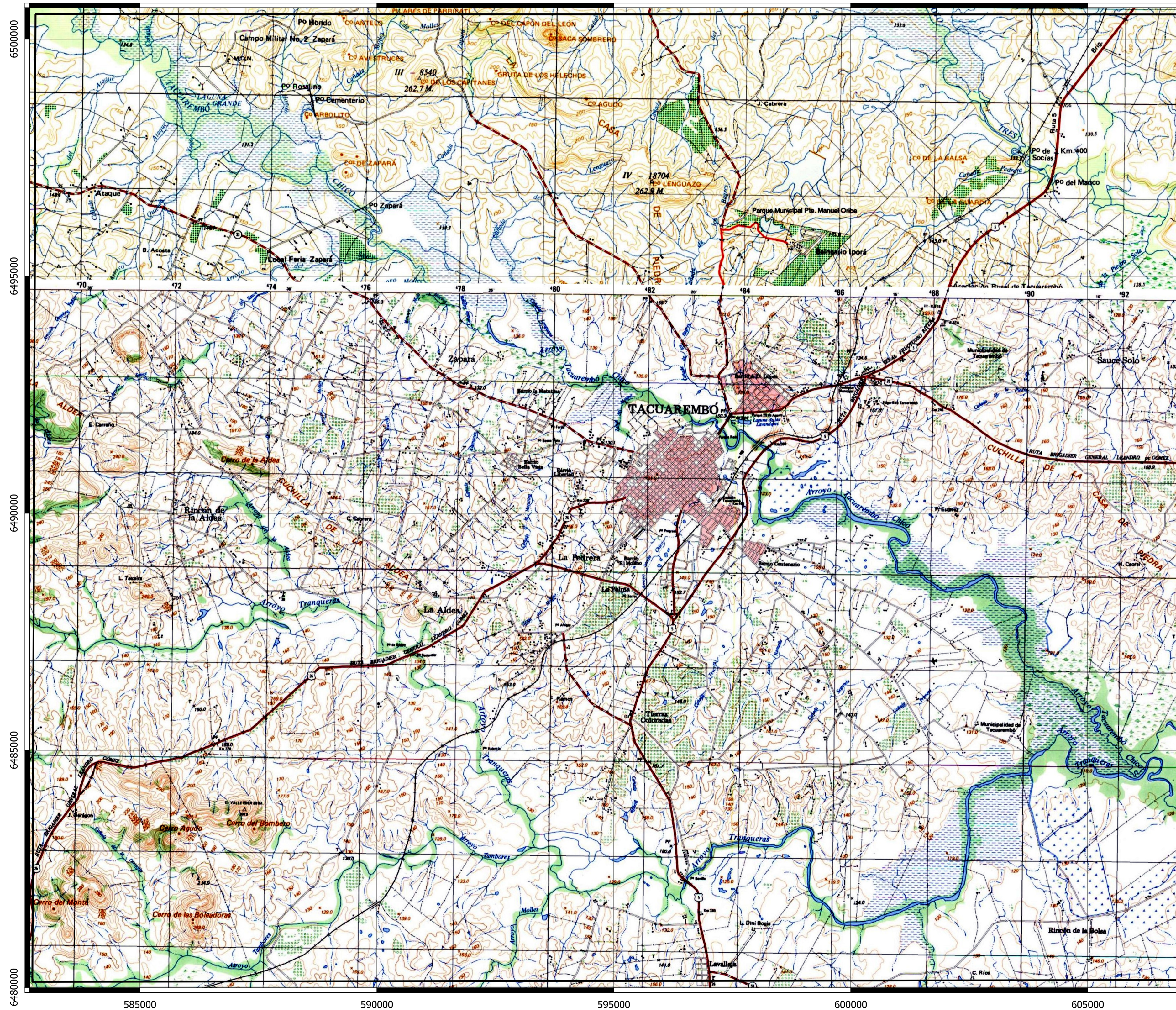
10. ANEXOS MAPAS



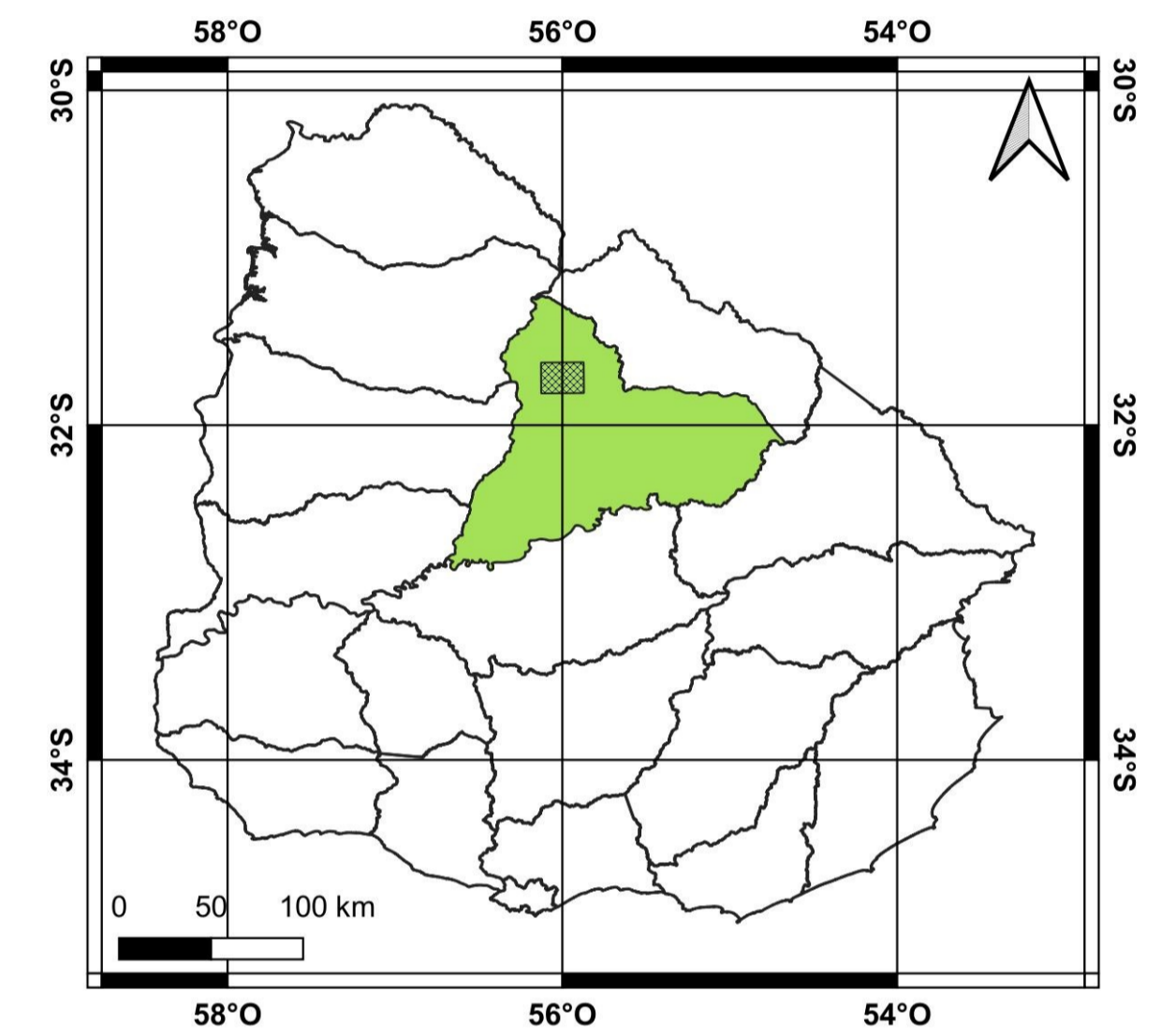
PROGRAMA DE DESARROLLO DE LAS CIENCIAS BÁSICAS
 Convenio entre el Ministerio de Educación y Cultura y la Universidad de la República
PEDECIBA - GEOCIENCIAS



Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) de la ciudad de Tacuarembó y alrededores



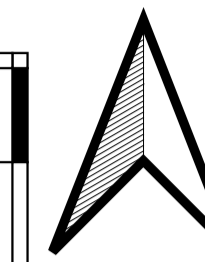
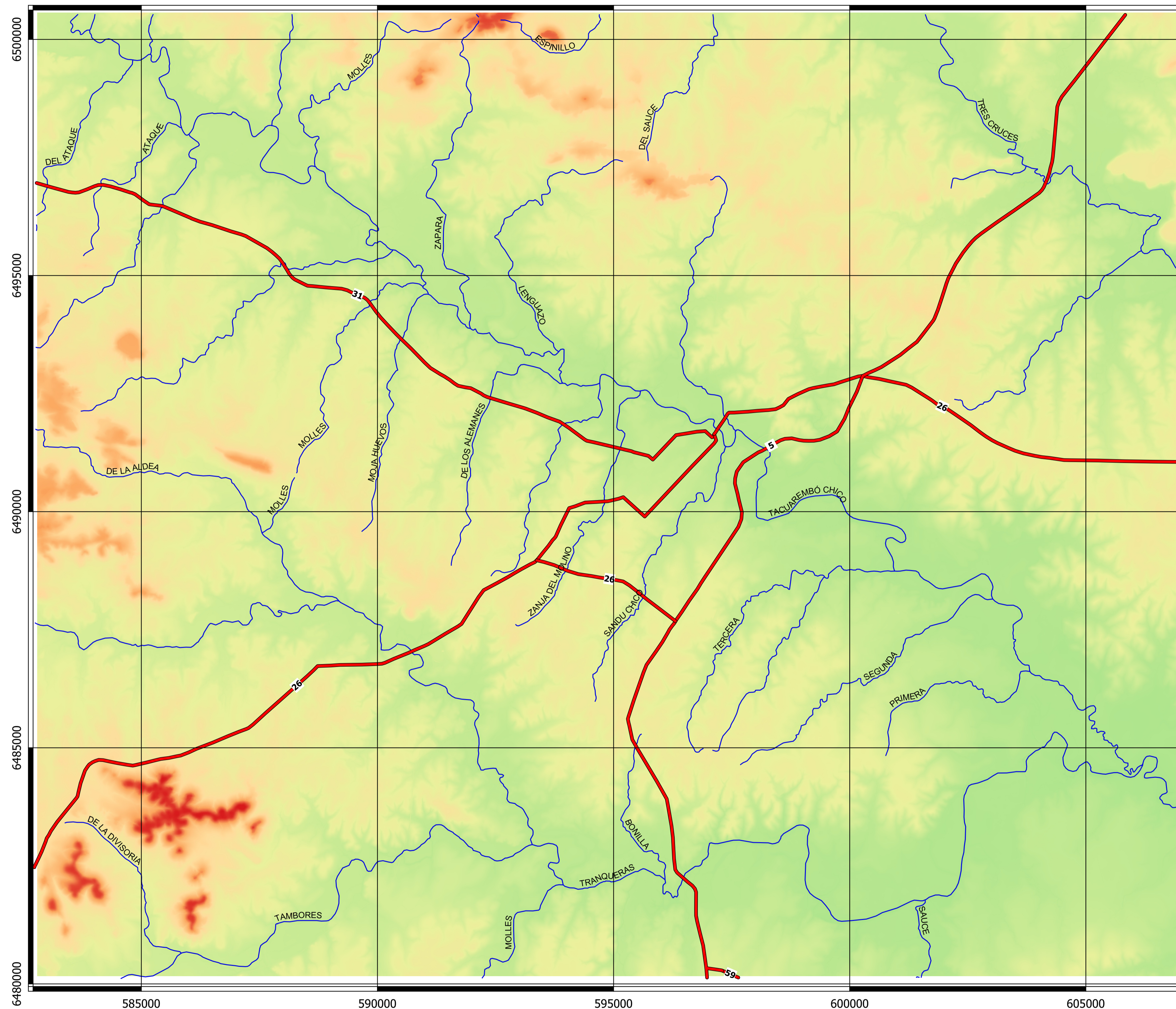
MAPA UBICACIÓN
 Escala 1/50.000



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: 0,9996
 Latitud de origen: 0,0000
 Unidad: Metros

Autor: Roberto Carrión
Títor: Didier Gastmans

Octubre de 2023






MODELO DIGITAL DEL TERRENO Escala 1/50.000



Modelos Digital de Terreno obtenido de la adquisición de Imágenes Digitales de Cobertura Nacional con tamaño del pixel en terreno 32 cm. Para el cálculo de las cotas ortométricas se utilizó el modelo geoidal EGM2008 EPSG 3855. IDE y AGESIC



Referencias

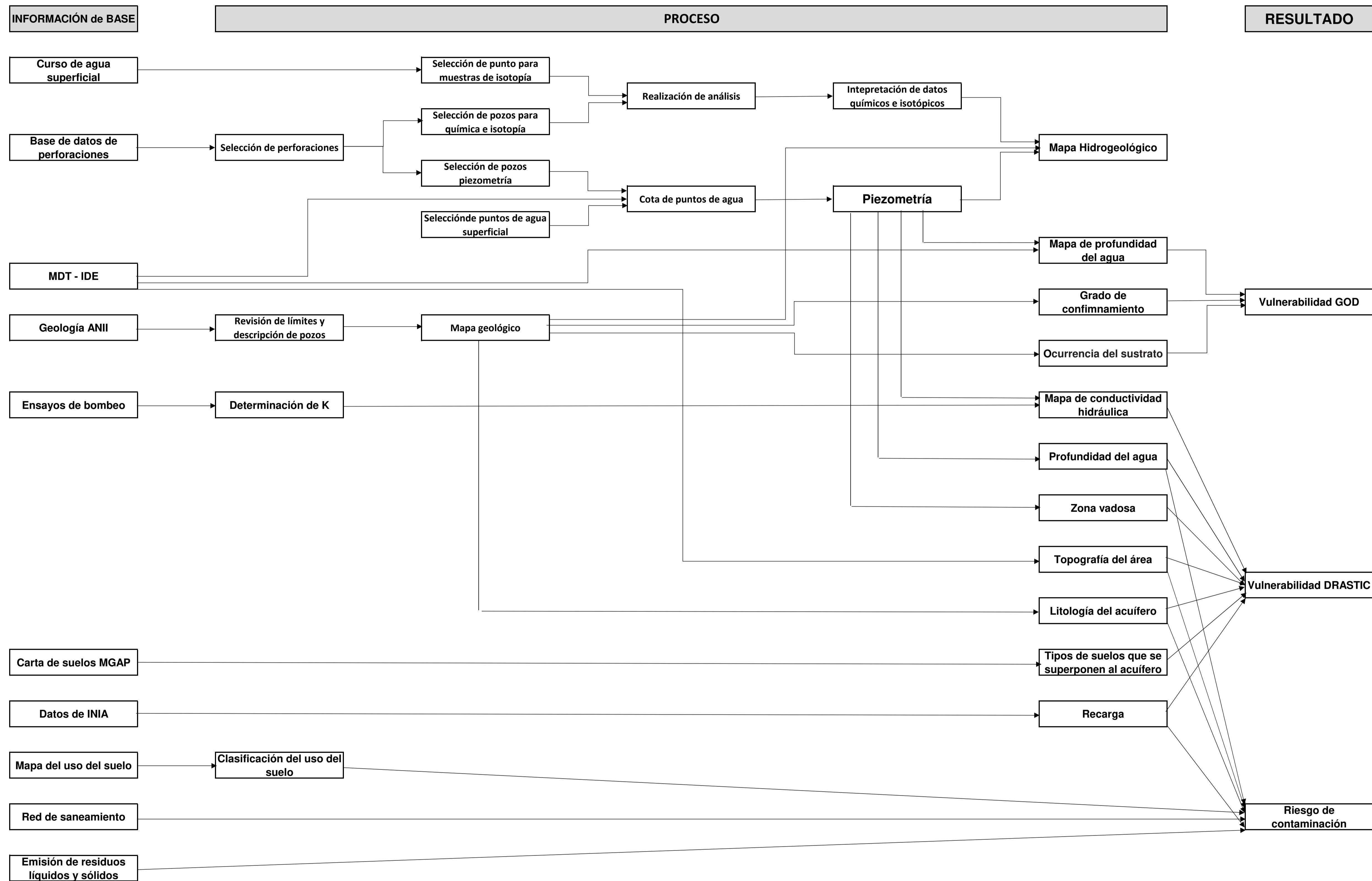
-  Ciudad de Tacuarembó
-  Cursos de agua
-  Principales rutas

MDT

-  100
-  150
-  200
-  250
-  300



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: 0,9996
Latitud de origen: 0,0000
Unidad: Metros



ÁREA PILOTO TACUAREMBÓ

MAPA GEOLÓGICO

ESCALA 1/50000

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

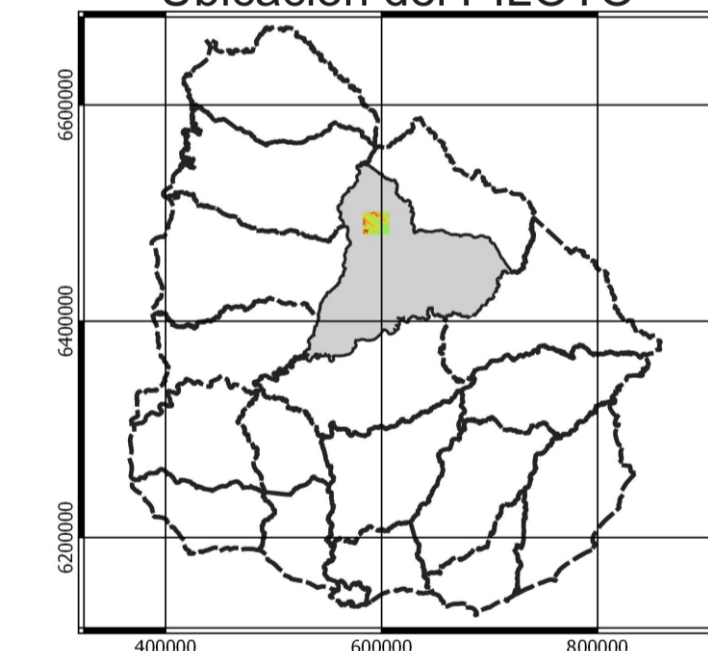
Estructuras

	Fallas
	Lineamientos

Referencias Geográficas

	Red hidrográfica principal
	Rutas principales

Ubicación del PILOTO



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

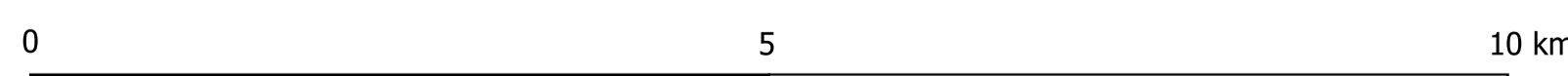
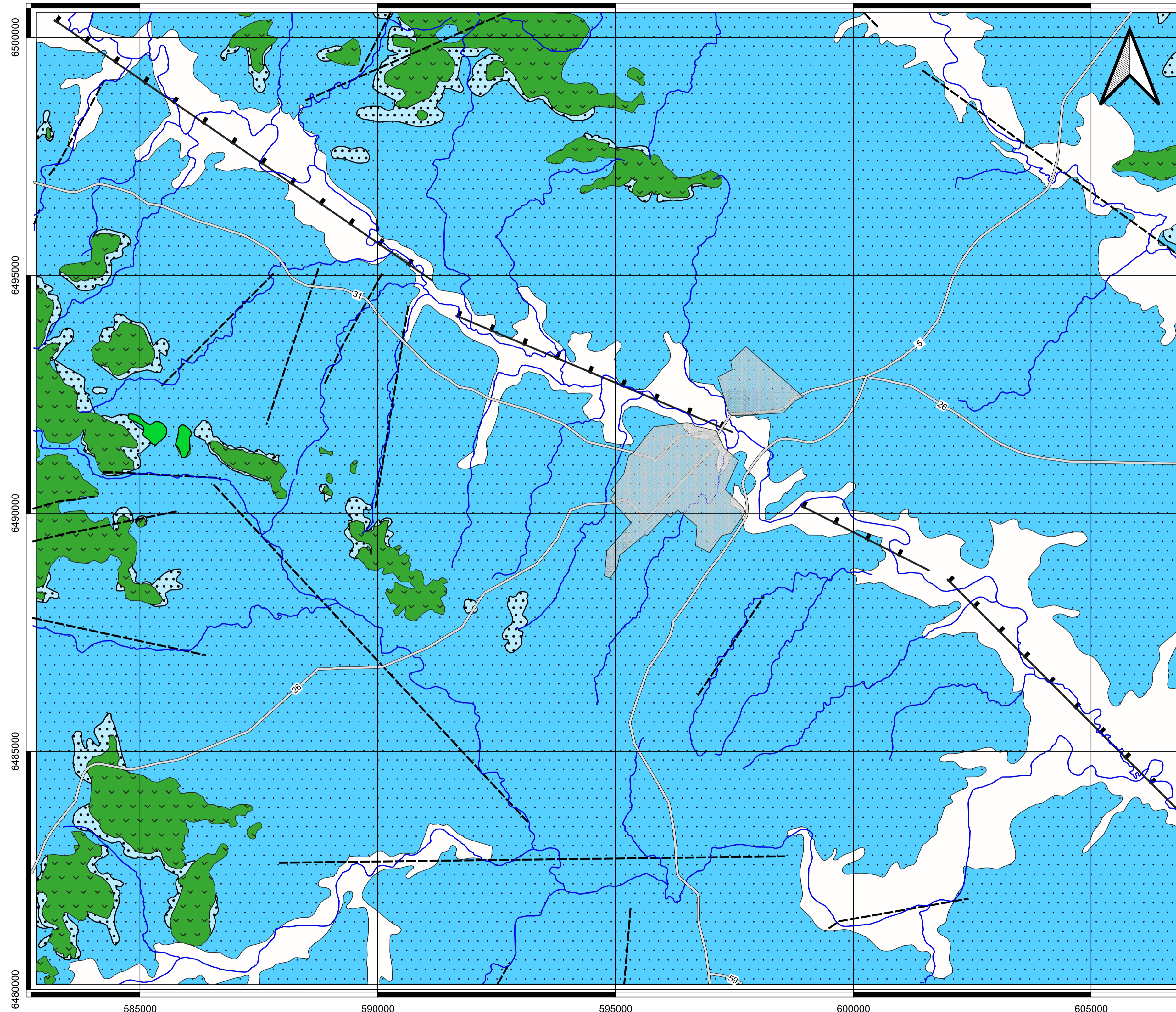
Falso Norte: 10.000.000

Meridiano central: -57,0000

Factor de escala: 0,9996

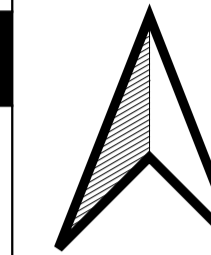
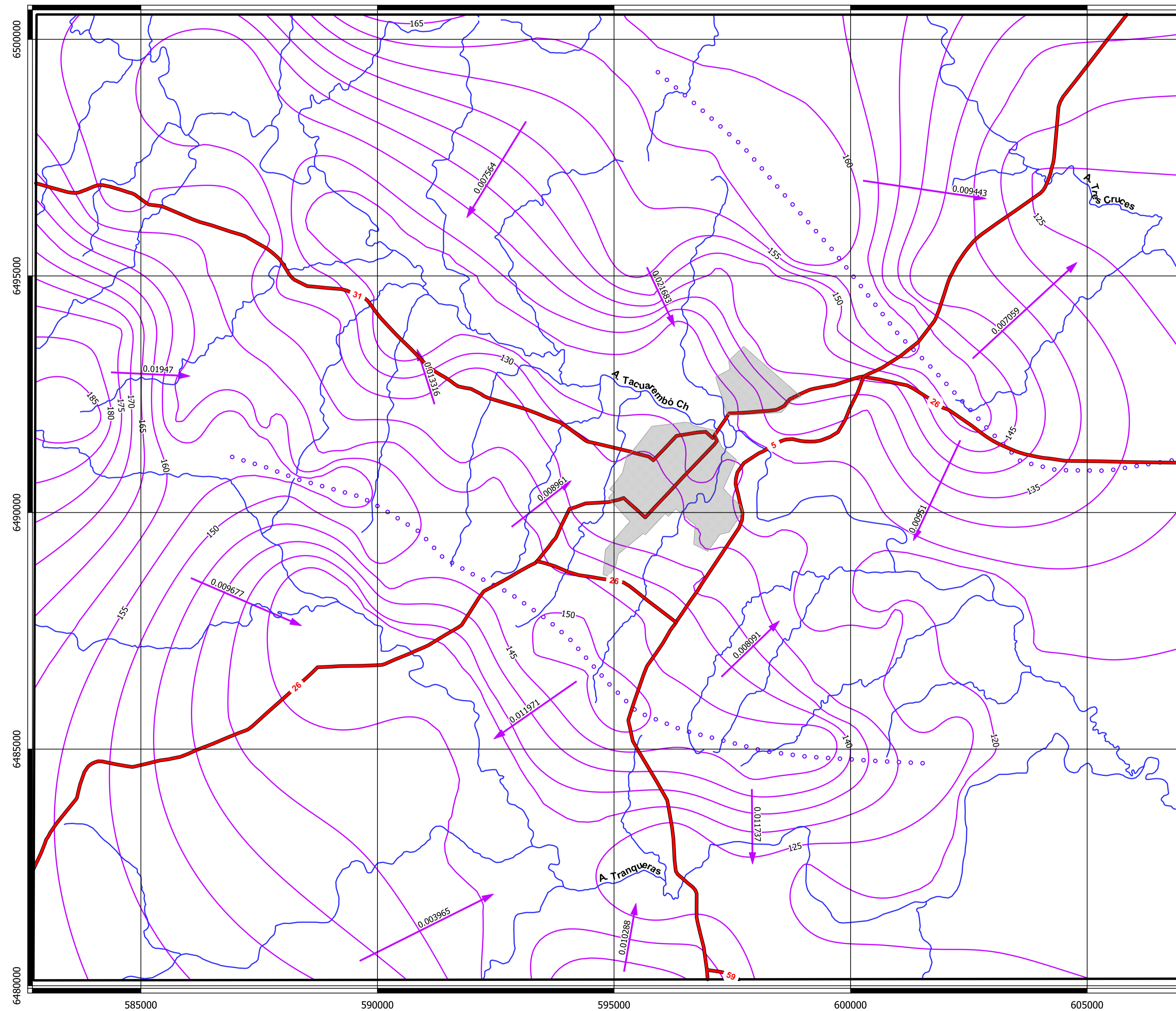
Latitud de origen: 0,0000

Unidad: Metros



1: 50.000

Setiembre 2022



MAPA PIEZOMÉTRICO
Escala 1/50.000



REFERENCIAS

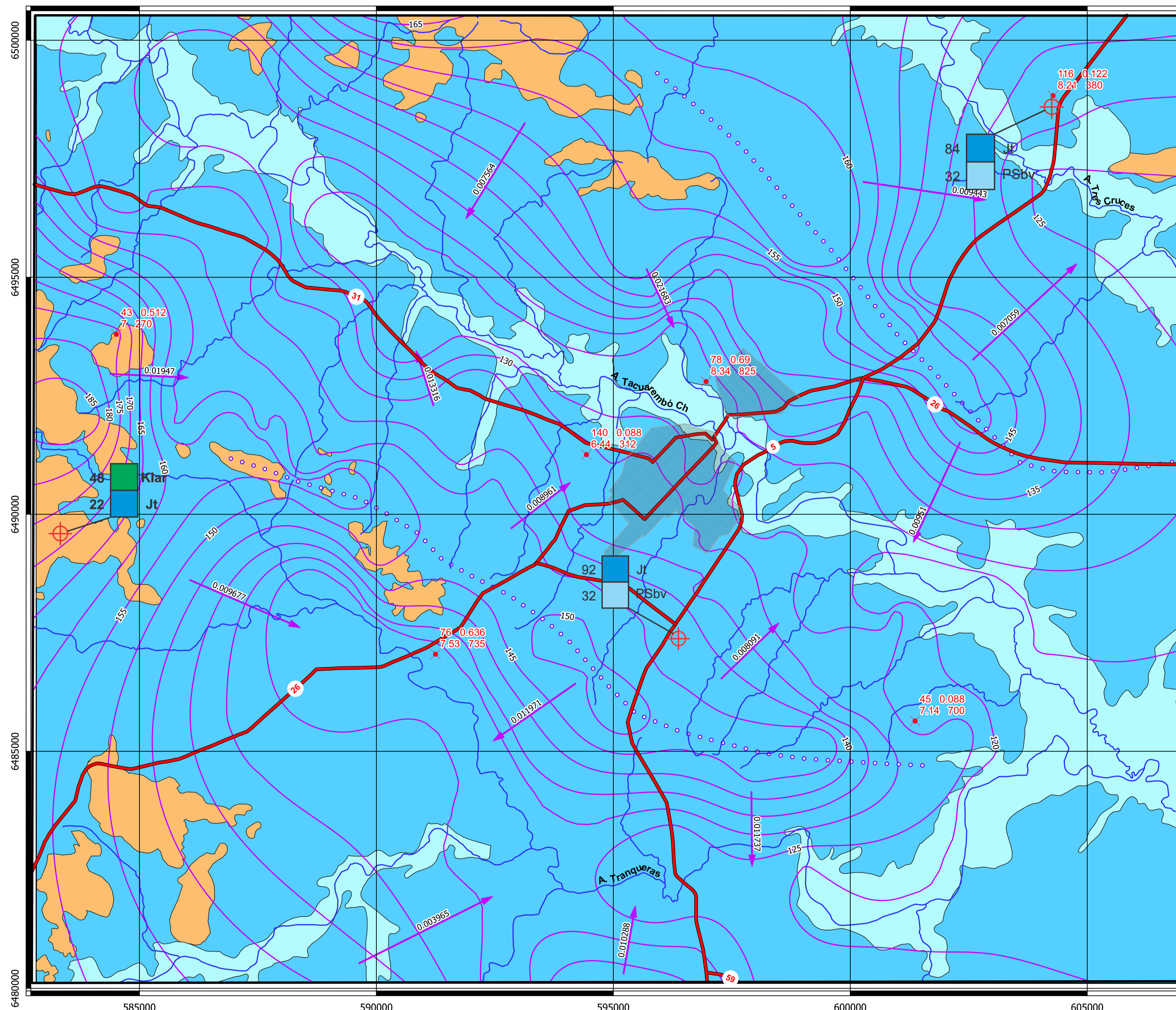
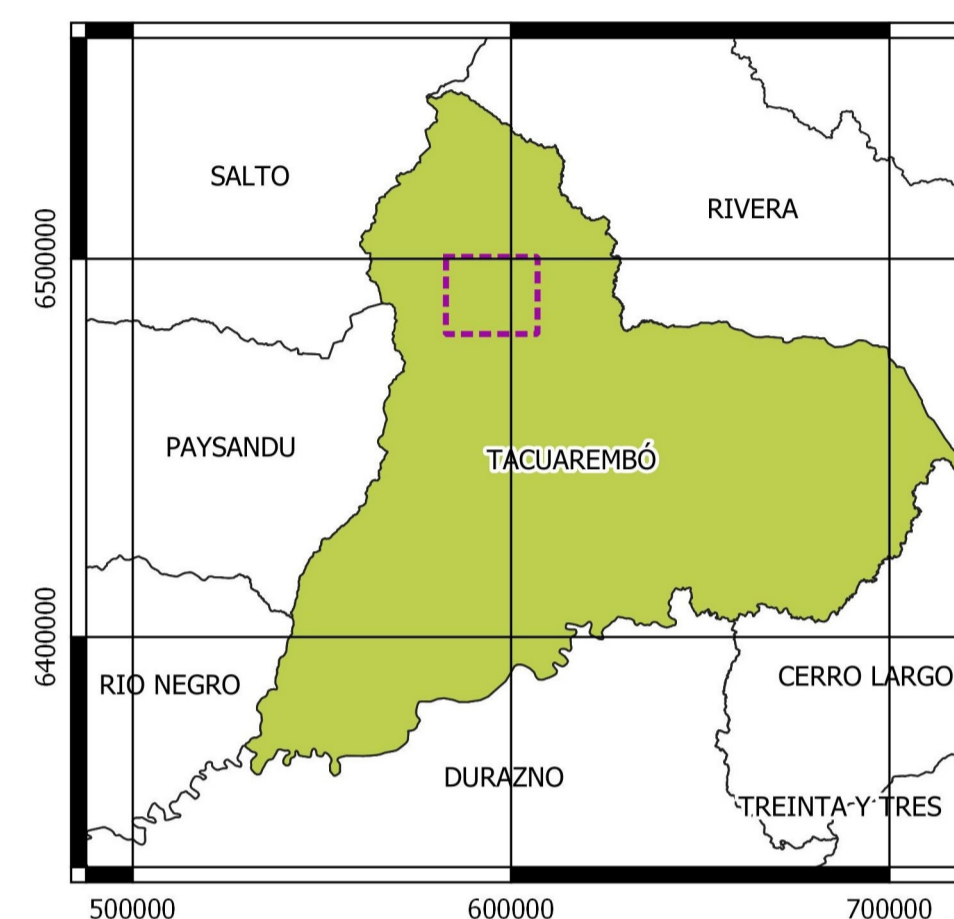
- Caminería
- Cursos de agua
- Divisoria de agua subterránea
- Líneas de flujo
- Curvas potenciométricas



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: 0,9996
Latitud de origen: 0,0000
Unidad: Metros

Autor: Roberto Carrión
Títor: Didier Gastmans

MAPA HIDROGEOLÓGICO
Escala 1/50.000

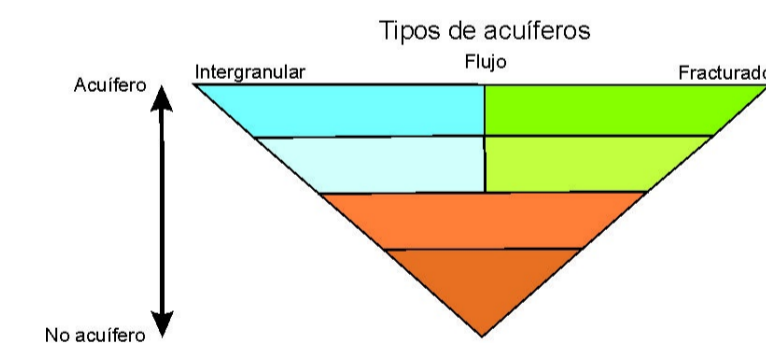


Referencias hidrogeológicas

- Tipos de acuíferos
 - Acuíferos en sedimentos consolidados y no consolidados
 - Acuíferos prácticamente improductivos en rocas ígneas
- Pozo hidroestratigráfico tipo
 - Jt
 - PSbv
- Divisoria de aguas subterráneas
- Curva potenciométrica
- Dirección de flujo subterráneo
- Pozo representativo
 - Profundidad
 - Caudal específico (m³/m)
 - pH
 - Conductividad (mS/cm)

Referencias geográficas

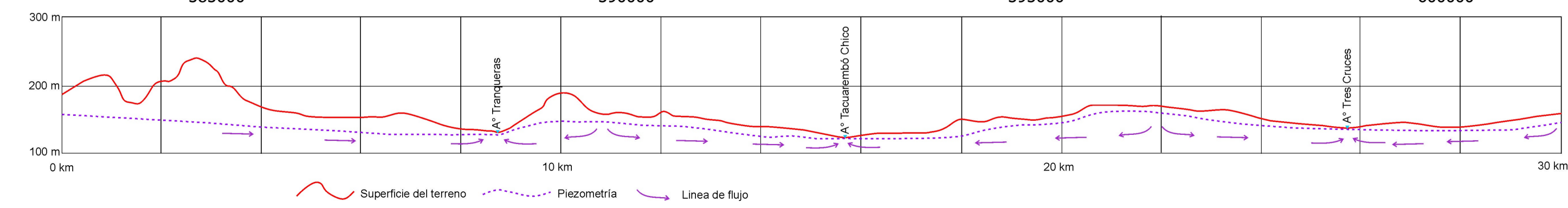
- Ciudad de Tacuarembó
- Cursos de aguas principales
- Rutas Principales



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: 0,9996
 Latitud de origen: 0,0000
 Unidad: Metros

Autor: Roberto Carrión
 Titulo: Didier Gastmans

Octubre de 2023



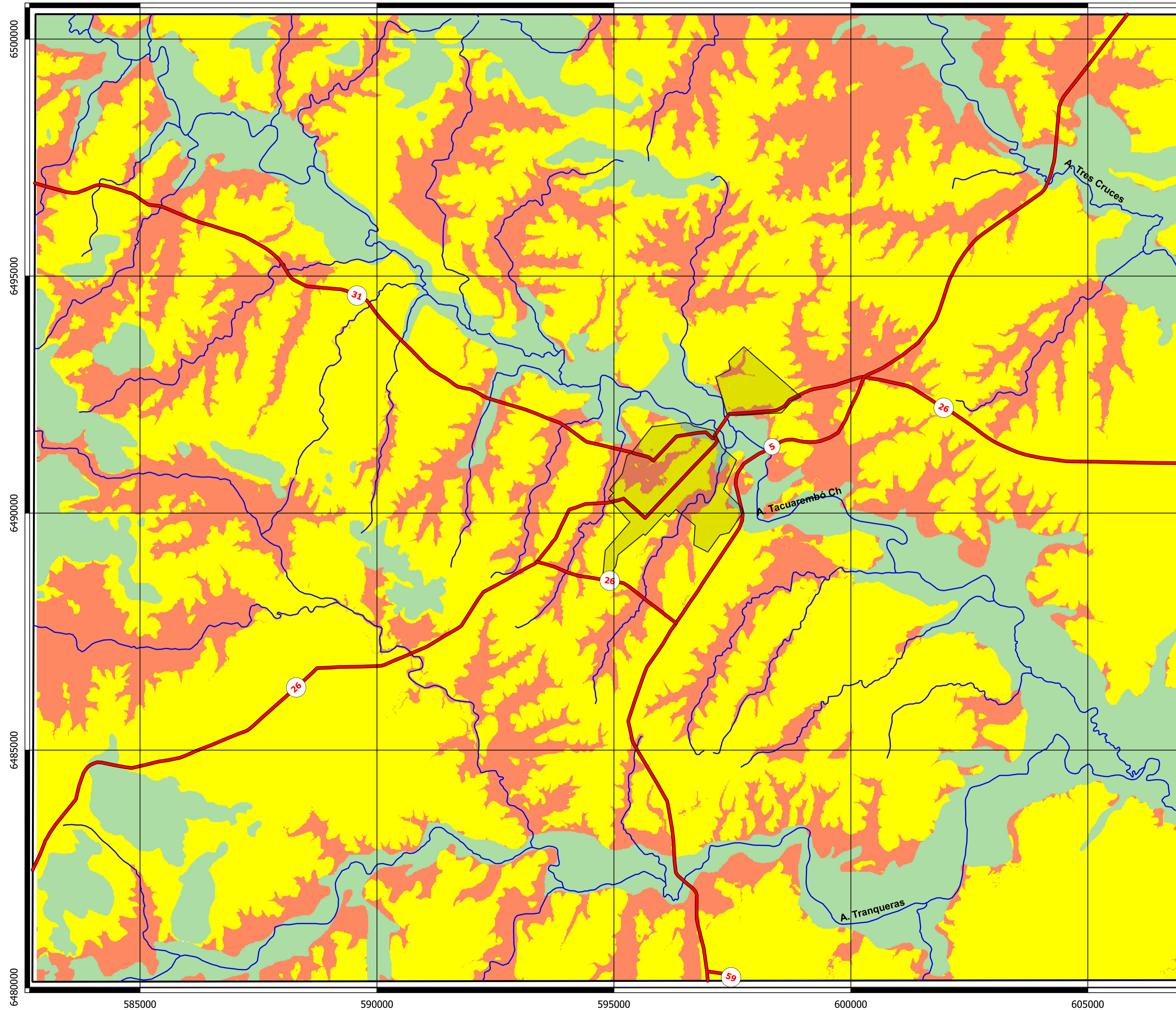
CORTE HIDROGEOLÓGICO
NORESTE - SUOESTE



PROGRAMA DE DESARROLLO DE LAS CIENCIAS BÁSICAS
 Convenio entre el Ministerio de Educación y Cultura y la Universidad de la República
PEDECIBA - GEOCIENCIAS



Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) de la ciudad de Tacuarembó y alrededores



**MAPA VULNERABILIDAD
 GOD
 Escala 1/50.000**



Referencias geográficas

- Ciudad de Tacuarembó
- Cursos de agua principales
- Rutas principales

**CLASIFICACIÓN VULNERABILIDAD
 SEGÚN MÉTODO GOD**

Clases

- DESPRECIABLE**
- BAJA**
- MEDIA**
- ALTA**
- EXTREMA**



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: 0,9996
 Latitud de origen: 0,0000
 Unidad: Metros

Autor: Roberto Carrión
Títor: Didier Gastmans

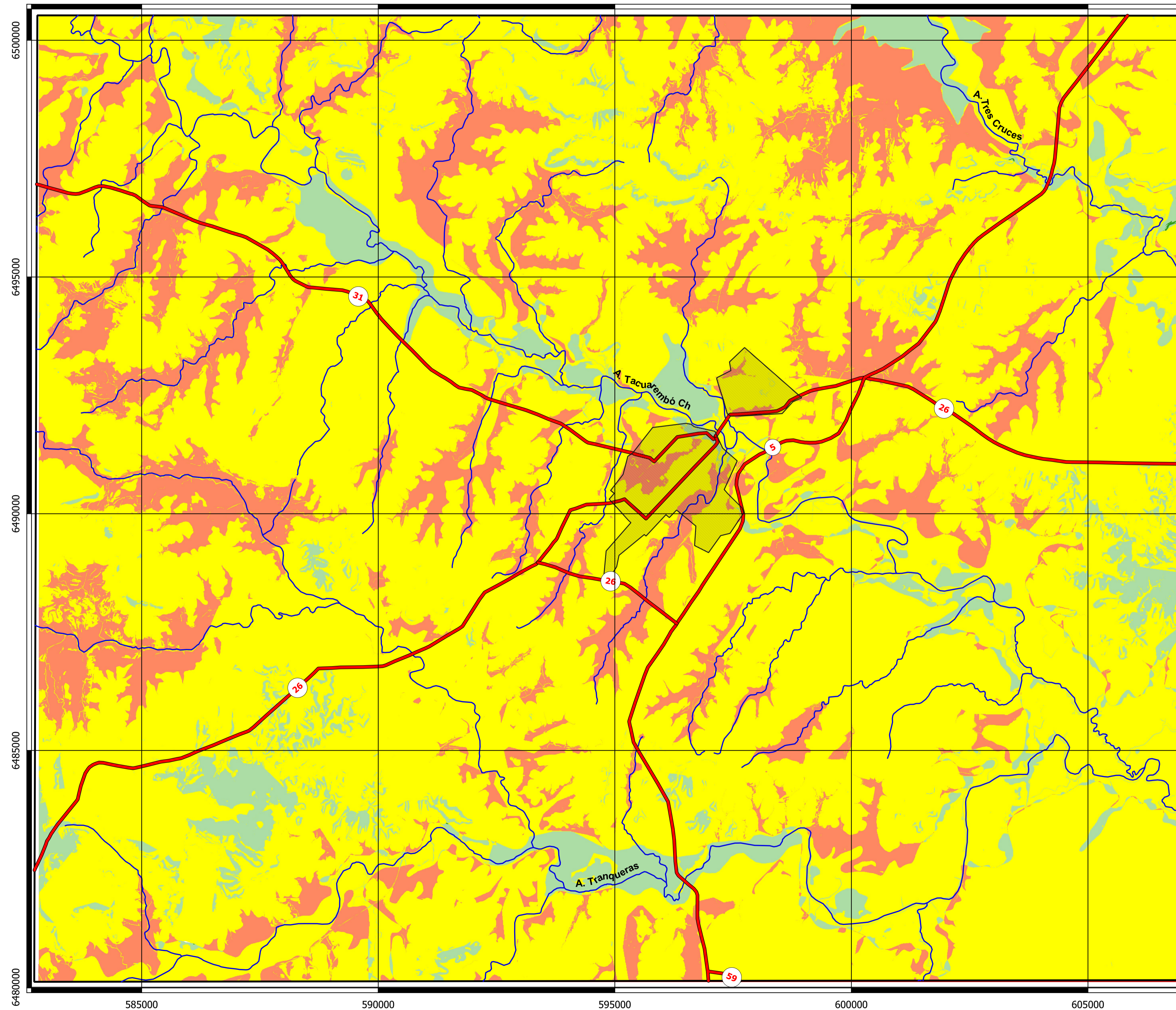
Octubre de 2022



PROGRAMA DE DESARROLLO DE LAS CIENCIAS BÁSICAS
Convenio entre el Ministerio de Educación y Cultura y la Universidad de la República
PEDECIBA - GEOCIENCIAS



Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) de la ciudad de Tacuarembó y alrededores



**MAPA VULNERABILIDAD
DRASTIC
Escala 1/50.000**



Referencias geográficas

- Ciudad de Tacuarembó
- Cursos de agua principales
- Rutas principales

**CLASIFICACIÓN VULNERABILIDAD
SEGÚN MÉTODO DRASTIC**

CLASES

- MUY BAJA
- BAJA
- NODERADA
- ALTA
- MUY ALTA



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: 0,9996
Latitud de origen: 0,0000
Unidad: Metros

Autor: Roberto Carrión
Títor: Didier Gastmans

Diciembre de 2022

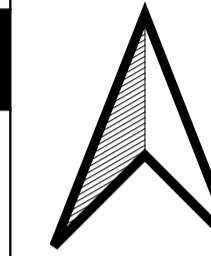


PROGRAMA DE DESARROLLO DE LAS CIENCIAS BÁSICAS
 Convenio entre el Ministerio de Educación y Cultura y la Universidad de la República
PEDECIBA - GEOCIENCIAS



Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) de la ciudad de Tacuarembó y alrededores

MAPA RIESGO A LA CONTAMINACIÓN
Escala 1/50.000



Referencias geográficas

- Ciudad de Tacuarembó
- Cursos de agua principales
- Rutas principales

CLASIFICACIÓN DEL RIESGO

Riesgo difuso

- Muy Bajo
- Bajo
- Medio
- Alto
- Muy Alto

Riesgo puntual

- Vertidos
- Toma de OSE
- Estaciones de Servicio
- Área con saneamiento



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: 0,9996
 Latitud de origen: 0,0000
 Unidad: Metros

Autor: Roberto Carrión
Títor: Didier Gastmans

Diciembre de 2022

