

Estimación de la Vulnerabilidad Hidrogeológica en la Ciudad de Minas sobre las Rutas
Nacionales N°8 y N°12, Departamento de Lavalleja, Uruguay

Laura Camila Ríos Vásquez

Trabajo de Grado Para Optar el Título de Geóloga

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

PhD. Ciencias Geológicas

Tutora

María Paula Collazo Caraballo

PhD. Ciencias Geológicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Dedico y agradezco a Dios por este logro, toda la gloria y honra es para Él, porque me ha fortalecido y de su mano todo es posible.

A mi madre María Helda, la mujer más noble, amorosa y servicial que existe, por ser mi alegría, mi esperanza y la fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A mis abuelos Enrique y Leticia y a mi tía Viviana, por el esfuerzo y preocupación continua por mi bienestar y al resto de mi familia Vásquez, por el valioso ejemplo de honestidad, solidaridad y perseverancia que me han inculcado desde niña.

A Laura Díaz, mi mejor amiga desde la infancia, por su lealtad y cariño incomparable en estos 15 años.

A Zareth Quintero, mi amiga compinche, por todos los momentos compartidos desde la adolescencia y por su complicidad en cada una de mis metas y proyectos.

Finalmente, con profundo amor y respeto dedico esta tesis a mi gran amigo Jhon Méndez, compañero de mil batallas, en todos los logros personales y profesionales que Dios disponga para mí en un futuro también estarás presente. Desde el cielo sigue cuidando mis pasos.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, mi alma mater, fue un verdadero privilegio lograr formarme en esta Institución. Viva la U pública, la del pueblo, la de todos.

Al profesor Juan Diego Colegial de la UIS, por su compromiso, paciencia y orientación en la elaboración del proyecto.

A la profesora Paula Collazo de la UDELAR, por su voto de confianza para llevar a cabo esta investigación y por su valioso apoyo a lo largo de mi intercambio académico.

Al Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas América Latina y el Caribe CEREGAS, por el patrocinio de los análisis de iones mayoritarios y al Laboratorio Tecnológico del Uruguay LATU, por la realización de éstos.

A la Geóloga Sandra Solano, por su consejo y colaboración con el procesamiento de los datos y a la Geóloga Paula Álvarez y al Geólogo Guillermo García, compañeros de campo en Minas, por las vivencias y el aprendizaje en este proceso.

A Federico, Diego, Santiago, Florencia, Greicy, Pamela y Pedro por brindarme apoyo y confianza en un país extranjero y por los preciosos momentos que compartimos. Así mismo agradezco a todas las buenas personas y compañeros de estudio con los que crucé en Uruguay y me hicieron sentir como en casa.

A mi grupo de amigos de la UIS, el "Geoteam", personas extraordinarias con las que aprendí, trabajé y disfruté todos estos años de vida Universitaria. Así mismo, a mis valiosas amigas que aún conservo del colegio con las que guardo una fuerte relación de hermandad, cariño y respeto.

A Juliana Ávila, por brindarme su tiempo y amistad incondicional y por ser mi ejemplo de constancia, esfuerzo y compromiso.

A Rafael Carrillo y demás compañeros que tuve la oportunidad de conocer en los meses de mi práctica empresarial, por la buena vibra y el grandioso trabajo en equipo que realizamos.

Por último, agradezco a toda la planta docente que desde el colegio hasta el pregrado en Geología aportaron su grano de arena a mi formación personal y profesional; gracias a cada uno de ellos por crear en mí el deseo de construir un camino en la docencia y la enseñanza.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Generalidades.....	16
2.1 Localización.....	16
2.2 Hidrografía.....	16
2.3 Relieve	18
3. Marco geológico	20
3.1 Geología regional.....	20
3.2 Geología local	24
3.3 Geología estructural	36
3.4 Hidrogeología	39
4. Marco legal	41
5. Marco teórico	44
5.1 Método SINTACS	46
5.2 Método GOD	56
5.3 Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas	59
6. Metodología	62
6.1 Desarrollo del modelo SINTACS	75
6.1.1 Parámetro S- Profundidad del nivel freático	75
6.1.2 Parámetro T- Efecto de mitigación de los suelos	77
6.1.3 Parámetro S- Pendientes.....	78

6.1.4	Parámetro I- Infiltración	79
6.1.5	Parámetro A- Características hidrogeológicas del acuífero, N- Capacidad de atenuación de la zona no saturada, C- Conductividad hidráulica	92
6.2	Desarrollo del modelo GOD	98
7.	Resultados.....	98
7.1	Resultados de vulnerabilidad hidrogeológica por el método SINTACS	98
7.2	Resultados de vulnerabilidad hidrogeológica por el método GOD	101
7.3	Clasificación de aguas.....	103
7.4	Caracterización fisicoquímica de las aguas.....	106
8.	Discusión.....	110
9.	Conclusiones	118
10.	Recomendaciones	120
	Bibliografía	122

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio. Sistema de referencia WGS_1984_UTM_Zone_21S.	17
Figura 2. Hidrografía del área de estudio.....	18
Figura 3. Formas de relieve que dominan en el área de estudio.	19
Figura 4. Modelo tectónico actual para el Uruguay propuesto por Bossi (2010).	21
Figura 5. Mapa geológico regional de la localidad de Minas.	22
Figura 6. AF1_MN: Formación Cerro de las Víboras-Grupo Mina Verdún. (A) Prominencia topográfica aislada donde se identificó la unidad (B) Metaignimbritas gris verdosas diaclasadas y oxidadas.	26
Figura 7. AF2_MN: Formación Don Mario-Grupo Mina Verdún (A) Pelitas gris oscuras laminadas (B) Niveles centimétricos de ceniza volcánica dentro de las pelitas.	27
Figura 8. AF3_MN: Formación Don Mario-Grupo Mina Verdún. (A) Extensión del afloramiento (B) Dique de basalto muy alterado afectando la secuencia de pelitas y areniscas (C) Niveles de carbonatos y óxidos de hierro karstificados y plegados (D) Paquete masivo de pelitas grisáceas finalizando la secuencia.	28
Figura 9. Mina Verdún, donde actualmente se explotan carbonatos de las Formaciones El Calabozo y Gibraltar.	29
Figura 10. AF4_MN: Conglomerado polimíctico de la Fm Las Ventanas, en cercanías a la Mina Verdún.....	30
Figura 11. AF5_MN: Afloramiento de cuarzoarenitas de la Fm Yermal en el casco urbano de Minas.....	31

Figura 12. AF6_MN: Afloramiento de pelitas masivas gris azuladas pertenecientes a la Fm Yermal-GAS.	32
Figura 13. AF7_MN: Tope de la Fm Yermal-GAS. (A) Extensión del afloramiento (B) Intercalación de pelitas con BIF (C) Vestigios de dolomita en cercanías del afloramiento.	33
Figura 14. AF8_MN: Formación Polanco-GAS. (A) Extensión del afloramiento (B, C, D) Evidencias de disolución karstica de los carbonatos que conforman la unidad.	34
Figura 15. AF9_MN: Aspecto macroscópico del sienogranito incluido dentro de la Unidad Granito de Minas.....	35
Figura 16. Mapa geológico del S y SW de la ciudad de Minas. Una porción del área de estudio (recuadro rojo) es delimitada y se encuentra afectada por el Sinclinal Verdún y el Anticlinal La Plata.....	37
Figura 17. Recorte del mapa hidrogeológico del Uruguay a escala 1:1'000.000.	40
Figura 18. Capa S-Profundidad del nivel freático por el método SINTACS.....	47
Figura 19. Capa I- Infiltración por el método SINTACS.	48
Figura 20. Capa N- Capacidad de atenuación de la zona no saturada por el método SINTACS.	49
Figura 21. Capa T- Efecto de mitigación de los suelos por el método SINTACS.	50
Figura 22. Capa A- Características hidrogeológicas del acuífero por el método SINTACS.....	51
Figura 23. Capa C- Conductividad hidráulica por el método SINTACS.	52
Figura 24. Pendiente por el método SINTACS.	53
Figura 25. Pesos asignados a las variables que componen el método de vulnerabilidad hidrogeológica GOD.....	58
Figura 26. Secuencia de Chebotarev.....	59
Figura 27. Diagramas de clasificación de aguas (a) Diagrama de Piper (b) Diagrama de Stiff. ..	60

Figura 28. Esquema metodológico del proyecto de investigación.	63
Figura 29. Mapa geológico a escala 1:20.000 del área de estudio.....	65
Figura 30. Columna estratigráfica generalizada de las litologías aflorantes en Minas, Uruguay. 66	
Figura 31. Bloquediagrama geológico del área de estudio.	67
Figura 32. Jornadas de revisión e inventario de pozos (A, B, C) pozos con brocal, (D, E, F) pozos recubiertos con tubería PVC.....	68
Figura 33. Proceso de recolección del muestreo hidroquímico (A, B) Uso de muestreador en un curso de agua superficial (C) Recipientes de plástico para el almacenamiento de las muestras previamente sanitizados con agua destilada y marcados con el indicativo del pozo.....	69
Figura 34. Inventario de pozos.....	70
Figura 35. Testigos de Sienogranito recuperados hasta los 60 metros de la perforación 80.3.023 Rutas 12 y 60, perteneciente a OSE.....	73
Figura 36. Plano de profundidad del nivel freático en la localidad de Minas por el método de interpolación IDW.	76
Figura 37. Mapa de textura de suelos de la localidad de Minas.	78
Figura 38. Mapa porcentual de pendiente del terreno de la localidad de Minas.	79
Figura 39. Polígonos de Thiessen-Estaciones de referencia.	81
Figura 40. Precipitación total acumulada, serie anual estaciones Minas Ciudad y Minas Campanero.	82
Figura 41. Precipitación media mensual (mm) multianual de la Estación Minas Ciudad y Estación Minas Campanero.	83
Figura 42. Valores medios mensuales de temperatura en °C para la ciudad de Minas por el periodo comprendido entre 1981 y 2018.	84

Figura 43. Mapa de cobertura de suelos de la localidad de Minas.	87
Figura 44. Plantaciones forestales y coberturas de pastizales saturadas en agua.	88
Figura 45. Mapa de infiltración eficaz en mm/año para la localidad de Minas.....	91
Figura 46. Mapa hidrogeológico local de la ciudad de Minas.	94
Figura 47. Zonificación de factores multiplicadores método SINTACS.....	97
Figura 48. Reclasificación de mapas de parámetros SINTACS.	99
Figura 49. Mapa de vulnerabilidad intrínseca de la ciudad de Minas por el método SINTACS.	100
Figura 50. Reclasificación de mapas de parámetros GOD.	101
Figura 51. Mapa de vulnerabilidad intrínseca de la ciudad de Minas por el método GOD.....	102
Figura 52. Clasificación de aguas por medio del diagrama de Piper.....	104
Figura 53. Clasificación de aguas por medio del diagrama de Stiff.	105
Figura 54. Tendencia de la evolución de aguas por medio del diagrama Stiff en la localidad de Minas.....	106
Figura 55. Diagramas de caja para los parámetros PH, STD y Turbidez.	107
Figura 56. Diagramas de caja para los parámetros Temperatura, Conductividad eléctrica, Resistividad eléctrica y potencial REDOX.....	108
Figura 57. Diagramas de caja para los aniones mayoritarios.....	109
Figura 58. Diagramas de caja para los cationes mayoritarios.....	110

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen de los principales parámetros fisicoquímicos establecidos para el agua potable en Uruguay.....	43
Tabla 2. Pesos asignados para los escenarios de ponderación del método SINTACS.	55
Tabla 3. Niveles de clasificación de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS.	56
Tabla 4. Resumen del inventario de pozos en la ciudad de Minas.	71
Tabla 5. Perforaciones de OSE en la localidad de Minas.	74
Tabla 6. Coeficientes Kp y Kv.....	87
Tabla 7. Valores de referencia de velocidad de infiltración básica f_c en mm/h según la textura del suelo.	89
Tabla 8. Coeficiente K_{fc} para cada textura de suelo.	90
Tabla 9. Carácter hidrogeológico de las unidades aflorantes en la localidad de Minas.	93
Tabla 10. Resultados de iones mayoritarios en concentraciones mg/l.....	103
Tabla 11. Rango de dureza del agua.	117

Resumen

Título: Estimación de la Vulnerabilidad Hidrogeológica en la Ciudad de Minas Sobre las Rutas Nacionales N°8 y N°12, Departamento de Lavalleja, Uruguay¹

Autor: Laura Camila Ríos Vásquez²

Palabras Clave: ZONIFICACIÓN, VULNERABILIDAD, AGUA SUBTERRÁNEA, HIDROGEOQUÍMICA, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Descripción:

Con el fin de aportar al conocimiento de los acuíferos presentes en la ciudad de Minas, departamento de Lavalleja, Uruguay; y estimar el grado de vulnerabilidad intrínseca de estas unidades hidrogeológicas frente a fuentes potenciales de contaminación utilizando sistemas de información geográfica, se llevó a cabo una investigación que involucró la cartografía y delimitación de las unidades geológicas aflorantes en el área, un inventario de pozos con la medición in situ de parámetros fisicoquímicos y un muestreo de aguas superficiales y subterráneas para el análisis de iones mayoritarios, información que se complementó con antecedentes geológicos y climatológicos consignados por varios autores.

Los resultados obtenidos demuestran la compleja historia geológica del área con la existencia de 15 formaciones reunidas en diversos grupos, que datan edades desde el Mesoproterozoico hasta el Cuaternario, con naturaleza sedimentaria, volcanosedimentaria e ígnea, algunas de ellas afectadas por fenómenos de metamorfismo. Estas rocas fueron agrupadas en 7 unidades hidrogeológicas que se distinguen entre sí por su grado de confinamiento, conductividad hidráulica, génesis y tipología de acuífero. La zonificación de vulnerabilidad intrínseca por los métodos de índice y ponderación SINTACS y GOD arrojaron diferencias significativas en la distribución de sus categorías, considerándose a SINTACS como la mejor alternativa por la integración de parámetros adicionales como la recarga del acuífero, escenarios de karstificación y fracturamiento, entre otros, que apoyan el conocimiento de las condiciones geológicas reales del área. Por su parte, la clasificación de aguas demostró que en la zona dominan las facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, con un tiempo de residencia corto en el acuífero, afectadas por fenómenos de intercambio iónico que favorecen su evolución a facies bicarbonatadas sódicas.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología UIS. Director: PhD. Juan Diego Colegial Gutiérrez. Tutora: PhD. María Paula Collazo Caraballo.

Abstract

Title: Estimation of Hydrogeological Vulnerability in the City of Minas on National Routes Number 8 and Number 12, Department of Lavalleya, Uruguay¹

Author: Laura Camila Ríos Vásquez²

Key Words: ZONING, VULNERABILITY, GROUNDWATER, HYDROGEOCHEMISTRY, GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS.

Description:

In order to contribute to the knowledge of the aquifers present in the city of Minas, department of Lavalleya, Uruguay; and to estimate the degree of intrinsic vulnerability of these hydrogeological units against potential sources of contamination using geographic information systems, an investigation was carried out that involved the mapping and delimitation of the outcropping geological units in the area, an inventory of wells with the in situ measurement of physicochemical parameters and a sampling of surface and groundwater for the analysis of major ions; information that was complemented with geological and climatological antecedents recorded by various authors.

The results demonstrated the complex geological history of the area with the existence of 15 formations gathered in various groups, dating from the Mesoproterozoic to the Quaternary ages, with sedimentary, volcanic-sedimentary, and igneous nature, some of them affected by metamorphic phenomena. These rocks were grouped into 7 hydrogeological units that are distinguished from each other by their degree of confinement, hydraulic conductivity, genesis and type of aquifer. The intrinsic vulnerability zoning and weighting methods by the SINTACS and GOD index yielded significant differences in the distribution of their categories, considering SINTACS as the best alternative due to the integration of additional parameters such as aquifer recharge, karstification and fracturing scenarios, among others, that support the knowledge of the real geological conditions of the area. In addition, the water classification showed that in the area the calcium and/or magnesium bicarbonate facies dominate, with a short residence time in the aquifer, affected by ion exchange phenomena that favor their evolution to sodium bicarbonate facies.

¹ Bachelor Thesis.

² Faculty of Physicochemical Engineering, Geology School, UIS. Director: PhD. Juan Diego Colegial Gutiérrez. Advisor: PhD. María Paula Collazo Caraballo.

Introducción

El departamento de Lavalleja es reconocido actualmente por las actividades de prospección y explotación de recursos minerales (calizas, mármoles, dolomitas, etc) de gran utilidad en el sector de la construcción, y como base industrial de la compañía SALUS, una empresa dedicada a la comercialización de agua mineral y cuya planta se encuentra a 12 km del casco urbano de la ciudad de Minas (Intendencia de Lavalleja, 2008). Así mismo, el impulso logrado por el sector agropecuario en los últimos años se ve reflejado con el incremento de cultivos de soja, la adecuación de tierras de pastoreo y la aforestación con Eucaliptos, actividades que se extienden sobre un área importante en el departamento. Al mencionado desarrollo industrial, se suma el hecho de un crecimiento urbanístico en la ciudad de Minas, visualizado con el asentamiento a lo largo de las rutas nacionales N° 8 y N° 12 de poblaciones que no cuentan con una cobertura total de servicios de saneamiento. Las anteriores premisas establecen una conjetura razonable sobre el deterioro al que se ven expuestos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos por la presencia de focos potenciales de contaminación (relaves mineros, pesticidas, aguas residuales, entre otros), quienes al mezclarse con las aguas de precipitación y transportarse por medio de escorrentía e infiltración, pueden llegar a alimentar dichas fuentes de abastecimiento. La ciudad de Minas no cuenta con un estudio local que permita la correcta delimitación de los sectores potencialmente susceptibles a la contaminación de las aguas subterráneas, por lo que el principal enfoque del presente estudio consiste en la aplicación de una metodología de zonificación de vulnerabilidad a la contaminación la cual requiere, como punto de partida, de un precedente en el conocimiento de los tipos de acuíferos, su naturaleza litológica, y los materiales que los suprayacen, así mismo se debe contemplar un análisis estadístico que permita completar la serie de datos meteorológicos

para la estimación del índice de infiltración efectiva de los acuíferos en el área, la ejecución de jornadas de campo para la consolidación de la cartográfica geológica, el relevamiento de pozos y la medición de niveles estáticos, entre otros aspectos requeridos para el desarrollo de las metodologías de zonificación. Con lo anterior, se espera generar una comparación entre la calidad del recurso actual, establecida por medio de la caracterización fisicoquímica y la determinación de posibles anomalías con respecto a los valores permitidos en la normatividad de agua potable para Uruguay; y los resultados de estimación de la vulnerabilidad hidrogeológica, como iniciativa de prevención y mitigación que logre sentar las bases de proyectos futuros en la región enfocados en la evaluación de la contaminación del recurso hídrico y planes de ordenamiento territorial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar el reconocimiento y la delimitación de los acuíferos presentes en inmediaciones a la ciudad de Minas, Uruguay, con el fin de determinar la vulnerabilidad hidrogeológica a la contaminación mediante la aplicación de un modelo de zonificación utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1.2 Objetivos específicos

Definir los acuíferos que conforman el área de estudio a través de la elaboración de un mapa hidrogeológico a escala 1:20.000.

Realizar un mapa piezométrico a escala 1:20.000 que permita determinar la profundidad de la capa freática.

Definir la recarga neta en mm/año del medio acuífero a partir del cálculo del balance hídrico de la cuenca.

Clasificar las unidades hidrogeológicas que componen la zona no saturada del medio acuífero.

Identificar cualitativamente la tipología y textura de los suelos como medida de la capacidad de atenuación de la carga contaminante hacia los acuíferos.

Generar un mapa de pendientes topográficas a escala 1:20.000 que permita definir los cambios de relieve en zonas estratégicas.

Clasificar y representar esquemáticamente la distribución de los iones mayoritarios en las muestras de agua obtenidas.

Correlacionar la tendencia de las facies hidroquímicas de aguas superficiales y subterráneas con los resultados del modelo de zonificación de vulnerabilidad hidrogeológica.

2. Generalidades

2.1 Localización

La zona de estudio comprende un área aproximada de 26,6 Km² y como referencia geográfica se encuentra delimitada por las rutas nacionales N° 8 y N° 12 hacia el sector SW del casco urbano de la ciudad de Minas, departamento de Lavalleja. Dicha extensión abarca diferentes puntos urbanos estratégicos como los Barrios Lavalleja, Escriu, España, Las Palmas, Garolini y La Plata; sectorización de Divisiones del Ejército Nacional; propiedades agropecuarias privadas; y campos ocupados por actividades mineras como es el caso de la cantera privada Verdún, de cementos Artigas S.A, con más de 100 años de operación en la región.

El sistema utilizado para la georeferenciación de las capas temáticas es el WGS_1984_UTM_Zone_21S, y el área se encuentra delimitada por los 4 pares de coordenadas planas que se muestran a continuación: 657939 mE/6196841 mN, 664039 mE/6193384 mN, 656068 mE/6193534 mN y 662166 mE/6190084 mN.

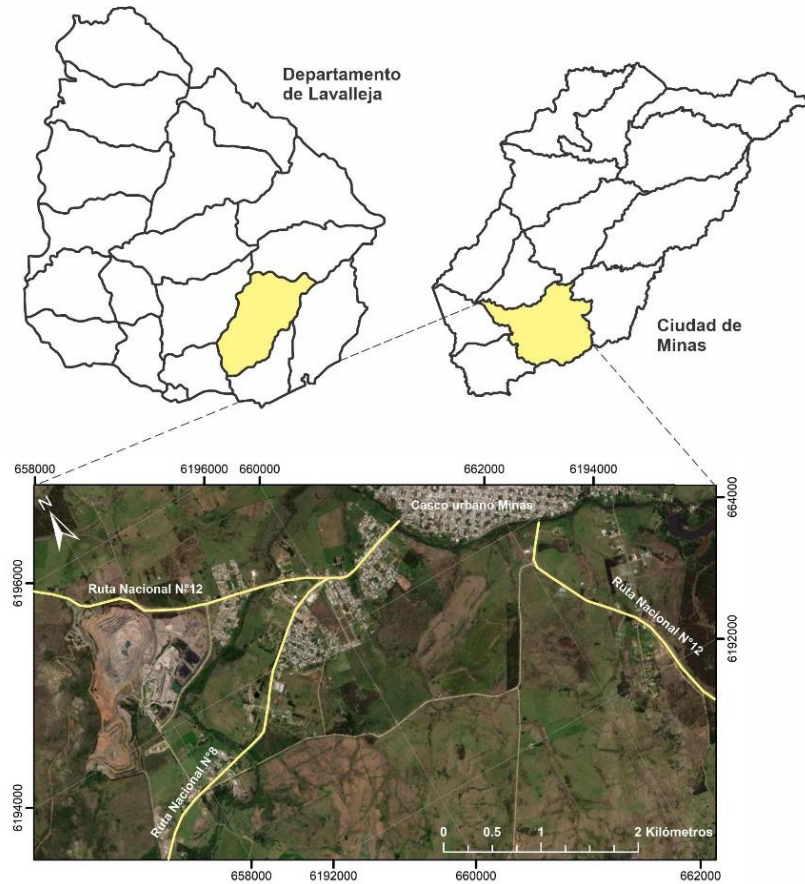
La Figura 1 expone esquemáticamente la división departamental de la República Oriental del Uruguay, donde se resalta el departamento de Lavalleja, y su capital, la ciudad de Minas, así mismo se define el área de estudio y las vías nacionales que la atraviesan.

2.2 Hidrografía

La red hidrográfica de Lavalleja se compone de dos cuencas principales: La cuenca del río Santa Lucía que alimenta todo el sector sur del departamento, y la cuenca del río Cebollati, que atraviesa la zona central y norte (Intendencia de Lavalleja, 2008).

Figura 1

Localización del área de estudio. Sistema de referencia WGS_1984_UTM_Zone_21S.



Nota. Tomado y adaptado de World Imagery (s.f).[Mapa de Minas, Uruguay en Esri ArcGIS versión 10.5]. Recuperado el 1 de Marzo de 2021.

La ciudad de Minas se encuentra alimentada por arroyos y cañadas afluentes del río Santa Lucía, identificadas gracias a las cartas topográficas G-27 Fuente del Puma y G-26 Minas a escala 1:50.000 realizadas por el Servicio Geográfico Militar del Uruguay (SGM) en el año 1999 y 2000 respectivamente, como se expone en la Figura 2. La red principal presente en el área es el Arroyo San Francisco, del cual se ramifica el Arroyo La Plata, ambos drenajes permanentes. Así mismo,

de estos dos afluentes derivan algunos cursos intermitentes, como lo son la Cañada del Coto, Cañada del Molino y la Cañada Lavalleja.

Figura 2

Hidrografía del área de estudio.



Nota. Tomado y adaptado del Servicio Geográfico Militar (1999; 2000).

2.3 Relieve

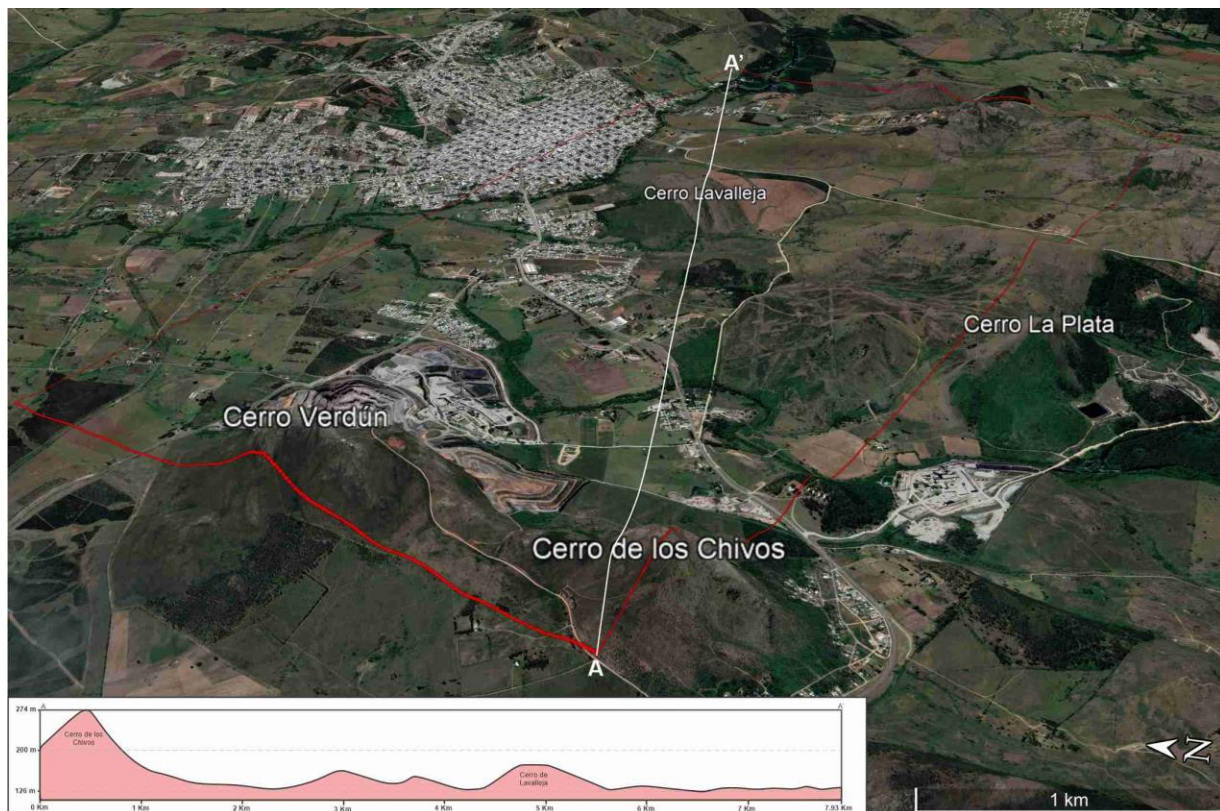
El relieve Uruguayo se caracteriza por ser suavemente ondulado, con el predominio de planicies, lomadas, cerros y colinas que presentan una altitud media de 117 metros (Pinheiro y Taborda, 2014).

A través de las cartas topográficas del Servicio Geográfico Militar (1999; 2000), se logra la identificación y clasificación de las principales prominencias del relieve que sobresalen en el área. Hacia la sección NW y S se encuentran las mayores elevaciones: Cerro Verdún con 326

metros, Cerro de Los Chivos con 303 metros y Cerro La Plata con 260 metros. Por otra parte, se presenta un relieve de llanura en los asentamientos urbanos sobre las rutas N° 8 y N°12, visualizándose un ligero cambio en la pendiente hacia el sector SE del casco urbano de la ciudad de Minas con prominencias como el Cerro Lavalleja y el Cerro de la Magdalena, con alturas aproximadas de 175 metros. La Figura 3 muestra un perfil esquemático en sentido SW-NE de la tendencia topográfica en la zona, donde se visualizan algunas de las elevaciones anteriormente mencionadas, así como las planicies que dominan en el área de estudio.

Figura 3

Formas de relieve que dominan en el área de estudio.



Nota. Tomado y adaptado de Google. (s.f).[Mapa de Minas, Uruguay en Google Earth]. Recuperado el 3 de Marzo de 2021.

3. Marco geológico

3.1 Geología regional

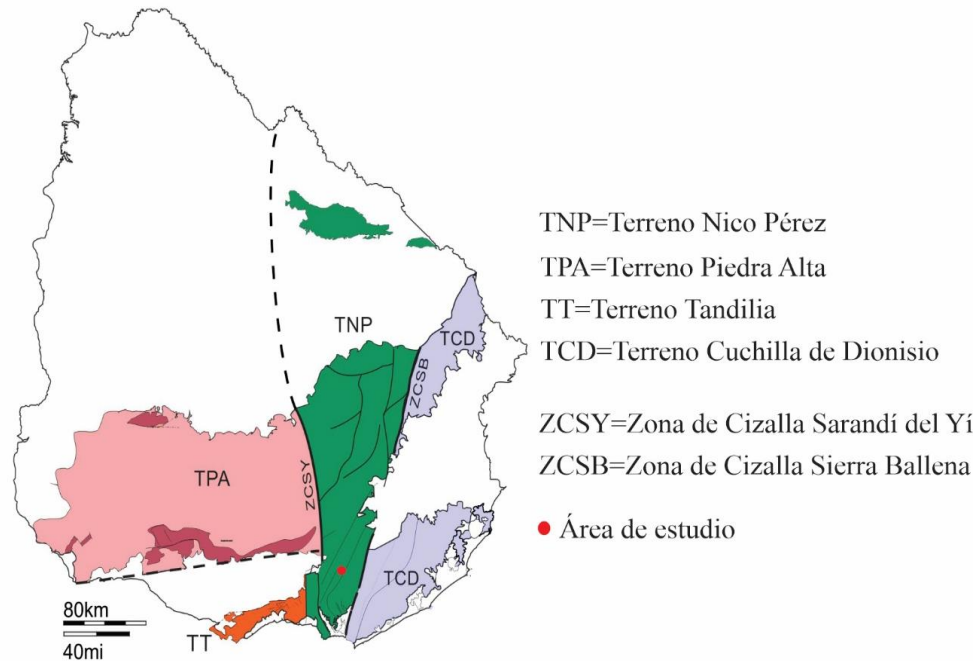
La comprensión de los rasgos litológicos y estructurales que definen al Escudo Uruguayo se ha favorecido con la integración, en las últimas décadas, de nuevos esquemas tectonoestratigráficos que permiten el avance en la reconstrucción de la historia geológica del territorio desde la era Precámbrica, con la caracterización de las rocas que integran el basamento cristalino y los eventos posteriores que las han afectado y que han dado lugar al desarrollo y evolución de extensas cuencas fanerozoicas; estructuras de gran interés en el área de prospección y explotación de yacimientos minerales en el país (Demarco et al., 2018).

Por lo anterior, el zócalo precámbrico Uruguayo es explicado por medio de la evolución de 4 bloques alóctonos, con una geocronología, estratigrafía y asociaciones litológicas radicalmente diferentes, desplazados y amalgamados a través de grandes fallas transcurrentes (Bossi, 2010).

El área de estudio se encuentra enmarcada dentro del Terreno Nico Pérez (Figura 4).

Figura 4

Modelo tectónico actual para el Uruguay propuesto por Bossi (2010).



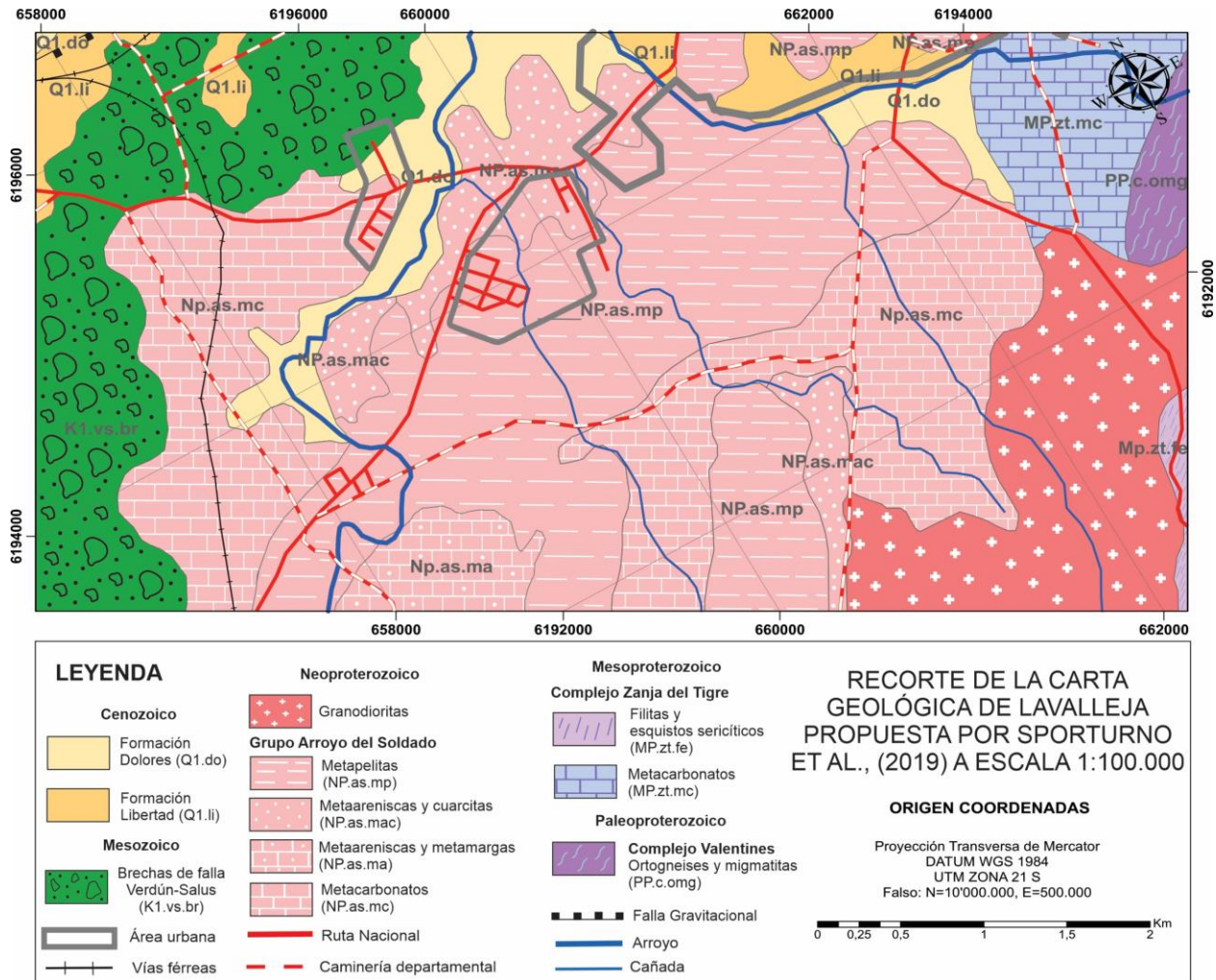
Nota. Tomado y adaptado de Demarco et al., (2018).

A partir de la carta geológica del departamento de Lavalleja a escala 1:100.000 propuesta por Spoturno et al., (2019) y presentada en la Figura 5, se realiza el reconocimiento regional de las litologías aflorantes en el área.

El primer registro documentado corresponde al Complejo Zanja del Tigre, de edad Mesoproterozoica, siendo los metacarbonatos el tipo litológico dominante con mantos de caliza, calizas dolomíticas y dolomias de grano fino a medio, afectadas por procesos de silicificación a través de venas de sílice recortando la caja carbonática (Spoturno y Oyhançabal, 2012).

Figura 5

Mapa geológico regional de la localidad de Minas.



Nota. Tomado y adaptado de Sportuno et al., (2019).

Las siguientes litologías reportadas se incluyen dentro del Grupo Arroyo del Soldado GAS; una potente secuencia sedimentaria de edad Neoproterozoica constituida por rocas siliciclásticas, niveles carbonáticos y depósitos químicos, con un registro que supera los 5000 metros de espesor (Gaucher, 2000).

Gaucher (2014) ordena la secuencia del GAS, de base a techo, de la siguiente manera: Formación (Fm) Barriga Negra, constituida en la base por conglomerados y brechas con clastos carbonatados, y niveles de conglomerados y areniscas hacia el tope; Fm Yermal, una secuencia siliciclástica granodecreciente de areniscas, pelitas, formaciones de hierro bandeado (BIF) y dolomías; Fm Polanco, constituida por bancos de calizas puras y ritmitas caliza-dolomía; Fm Cerro Espuelitas, conformada por una alternancia de lutitas, BIF, chert y niveles de carbonatos; Fm Cerros San Francisco, una secuencia granodecreciente compuesta de cuarzoarenitas y limolitas; y Fm Cerro Victoria, que incluye bancos de calizas micríticas y oolíticas que gradan hacia el techo a calizas estromatolíticas.

La siguiente unidad reportada en la zona y estratigráficamente posterior a la depositación del GAS es el Granito de Minas, a quién se le atribuye una edad Cámbrica de alrededor de 530 Ma (Gaucher et al., 2004) análoga con los datos geocronológicos notificados para el Granito de Guazunambi por Kawashita et al., (1999). El emplazamiento de este plutón se encuentra fuertemente controlado por el Lineamiento Arroyo de La Plata, quién genera un impacto en la secuencia sedimentaria del GAS a través del intenso metamorfismo de contacto y plegamiento de la Fm Yermal, desarrollando “escamas de mica”, sin una orientación definida; y de la Fm Polanco, con la aparición mármoles en la zona de contacto (Gaucher et al., 2004).

En el Jurásico tardío-Cretácico temprano, un fenómeno de extensión cortical dio lugar a la apertura del Atlántico y a la separación de América del Sur de África, fenómeno expuesto en el área con el Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín (SaLAM), interpretado como un rift abortado que controló la sedimentación y el magmatismo de la cuenca Santa Lucia (Rosello et al., 2007). La depositación de brechas de la falla Verdún Salus hacia el W de Minas en dirección a la cuenca Santa Lucia apoya la manifestación tectónica de edad Cretácica en el área.

A finales del terciario y durante el cuaternario, el régimen de depositación en el territorio estuvo ligado a cambios climáticos y de nivel de las mareas, con una alternancia de episodios marinos y continentales evidenciados actualmente sobre las áreas topográficamente más bajas cercanas a la costa (Preciozzi et al., 1985). La Formación Libertad y la Formación Dolores culminan el registro estratigráfico de la localidad de Minas y su ambiente de depositación se encuentra vinculado a un régimen continental de transporte eólico y flujos de barro (Preciozzi et al., 1985).

La Fm Libertad, de edad pleistocénica, se encuentra constituida por lodolitas masivas pardas y ocasionalmente loess, ricos en cuarzo y feldespatos, con bajos contenidos de arenas y carbonatos de calcio en forma de concreciones y lentes; por su parte, la Fm Dolores, datada en el Pleistoceno Superior, se interpreta como una depósito limo arcilloso-limo arenoso de tonalidades pardas y grises verdosas, compuesto por cantidades variables de arena y gravilla y con presencia de carbonato de calcio disperso en todo el perfil o a manera de concreciones (Preciozzi et al., 1985). Geomorfológicamente esta unidad se asocia a planicies aluviales jóvenes como cauces de arroyos (Ribero, 2019).

3.2 Geología local

A continuación se exponen los afloramientos más representativos de algunas de las litologías anteriormente mencionadas, cartografiadas en diferentes jornadas de campo, reconociendo un nuevo grupo hacia el NW del área (Grupo Mina Verdún GMV); información que se complementa con la geología descriptiva y estructural trabajada en detalle por Álvarez (2020) en cercanías a la localidad de Minas.

El Grupo Mina Verdún (GMV) se define como una sucesión volcanosedimentaria, siliciclástica y carbonática de edad Mesoproterozoica, constituida mayoritariamente por pelitas negras, margas, calizas y dolomias (Poiré, 2014).

Poiré et al., (2003) separa en 4 unidades las litologías aflorantes del Grupo Mina Verdún. Define, de base a techo, las siguientes formaciones: Formación Don Mario, compuesta de lutitas negras y pizarras, Formación La Toma, con margas verdes oscuras a negras, Formación El Calabozo, caracterizada por bancos de calizas grises, masivas, laminadas y estromatolíticas y Formación Gibraltar, quien integra dolomias, calizas, pelitas y margas. Estudios realizados por Gaucher et al., (2008) reconocen una nueva formación, de origen volcánico, que subyace concordantemente a la secuencia identificada por Poiré et al., (2003) y Poire et al., (2005), y la definen como Formación Cerro de Las Víboras, una secuencia de metariolitas que constituyen la base del Grupo Mina Verdún.

Formación Cerro de Las Víboras

El registro de esta unidad en el área de estudio confirma su naturaleza volcánica por referirse a unas rocas extrusivas de composición ácida, ligeramente metamorfizadas, clasificadas como meta-ignimbritas. A nivel de afloramiento se evidencia un macizo rocoso fuertemente diaclasado, de tonalidades gris verdosas con pátinas de oxidación que le atribuyen coloraciones naranjas intensas.

Figura 6

AF1_MN: Formación Cerro de las Víboras-Grupo Mina Verdún. (A) Prominencia topográfica aislada donde se identificó la unidad (B) Metaignimbritas gris verdosas diaclasadas y oxidadas.



Álvarez, (2020) sugiere un contacto transicional de la Fm Cerro de Las Víboras con las pelitas de la Fm Don Mario, y un contacto fallado con la Fm Yermal y la Fm Polanco, pertenecientes al Grupo Arroyo del Soldado GAS.

Formación Don Mario

El primer afloramiento de esta unidad en la zona fue encontrado dentro de las instalaciones de la división IV del Ejército Nacional, y refiere a una roca de grano fino, de colores grisáceos a negros, con una visible laminación asociada a un fenómeno de metamorfismo, por lo que es clasificada como una “meta-pelita”, rica en materia orgánica, quién evidencia una ligera oxidación que le asigna coloraciones pardas y naranjas intensas a ciertas porciones de la muestra. Por otra parte, se encontraron vestigios de una fracción donde aumenta el porcentaje de arenas, siendo concordante con las características reportadas por (Poiré y Gaucher, 2009) en la base de la

formación. Así mismo, se evidencian niveles de ceniza volcánica, de espesores centimétricos, afectando la unidad.

Figura 7

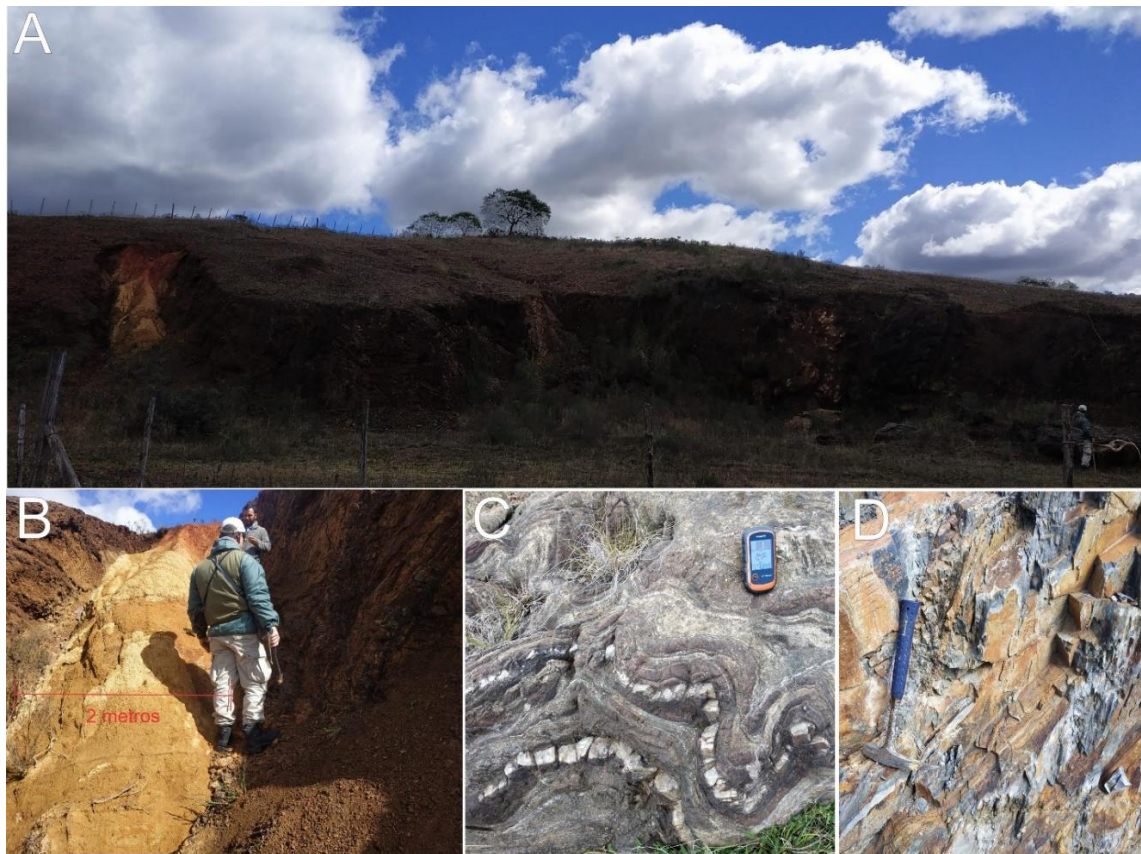
AF2_MN: Formación Don Mario-Grupo Mina Verdún (A) Pelitas gris oscuras laminadas (B) Niveles centimétricos de ceniza volcánica dentro de las pelitas.



Un segundo afloramiento fue reportado en cercanías al Barrio España de la Ciudad de Minas. Con más de 120 metros de extensión, se encuentra constituido en dirección SE-NW por 30 metros de intercalaciones entre pelitas y areniscas cuarzosas, competentes, de tonalidades grisáceas, intruidas por diques de basalto de grano fino, muy alterados y de espesores variables (30 cm a 2 metros); seguido de 12 metros de niveles cuarzo dolomíticos, alternados con franjas de óxido de hierro. La secuencia finaliza con un paquete de 80 metros de pelitas bien laminadas, de tonalidades gris oscuras.

Figura 8

AF3_MN: Formación Don Mario-Grupo Mina Verdún. (A) Extensión del afloramiento (B) Dique de basalto muy alterado afectando la secuencia de pelitas y areniscas (C) Niveles de carbonatos y óxidos de hierro karstificados y plegados (D) Paquete masivo de pelitas grisáceas finalizando la secuencia.



Álvarez (2020) reúne a las formaciones Calabozo y Gibraltar en una única entidad estratigráfica a quién denomina “Carbonatos del Grupo Mina Verdún”. En la zona de estudio no se presencié ningún otro afloramiento de dichas unidades a excepción de la evidencia actual de

explotación de niveles calcáreos dentro de la cantera, por lo que se apoya la propuesta del término (Figura 9).

Figura 9

Mina Verdún, donde actualmente se explotan carbonatos de las Formaciones El Calabozo y Gibraltar.



La siguiente formación reportada en orden cronoestratigráfico es la *Formación Las Ventanas*.

La Formación Las Ventanas abarca una potente secuencia constituida principalmente por rocas psefíticas, las cuales se apoyan en discordancia angular y erosiva sobre el Grupo Mina Verdún en su área tipo y al W de Minas, donde se dispone como relleno del paleokarst labrado por los carbonatos de la Formación Gibraltar en el tope de esta entidad, exhibiendo una menor potencia a causa de su acuífamiento (Blanco y Gaucher, 2005).

En el área de estudio, esta unidad fue reconocida a partir de un pequeño afloramiento, contiguo a la Mina Verdún, sobre el margen izquierdo de la ruta Nacional N°12 en dirección a la ciudad de Minas (Figura 10). Consiste en un conglomerado polimíctico de tonalidades pardas y violáceas, con clastos subredondeados mal seleccionados que presentan niveles de areniscas cuarzosas de tonalidades grisáceas, muy oxidadas.

Figura 10

AF4_MN: Conglomerado polimíctico de la Fm Las Ventanas, en cercanías a la Mina Verdún.



Formación Yermal

Inicialmente, dentro del casco urbano, fue encontrado un afloramiento de arenisca rica en cuarzo de tonalidad gris clara, con buena compactación, cubierta por una delgada capa de suelo residual. El macizo se encuentra fracturado, con discontinuidades separadas pocos centímetros (Figura 11). Dato de estratificación $275^{\circ}/24^{\circ}$.

Así mismo, Álvarez (2020) confirma la presencia de este miembro de areniscas constituyendo el Cerro de los Chivos y en el Cerro Verdún, hacia el NW de la zona de estudio.

Figura 11

AF5_MN: Afloramiento de cuarzoarenitas de la Fm Yermal en el casco urbano de Minas.



Un segundo afloramiento, referido al miembro pelítico de esta unidad, fue reportado sobre el margen derecho por la ruta N°8 en dirección a la ciudad de Minas. Consiste en unos niveles de roca de grano muy fino, con buena compactación, de tonalidades gris azuladas, con dato de estratificación $70^{\circ}/30^{\circ}$, afectada intensamente por dos familias de diaclasas (Figura 12).

Figura 12

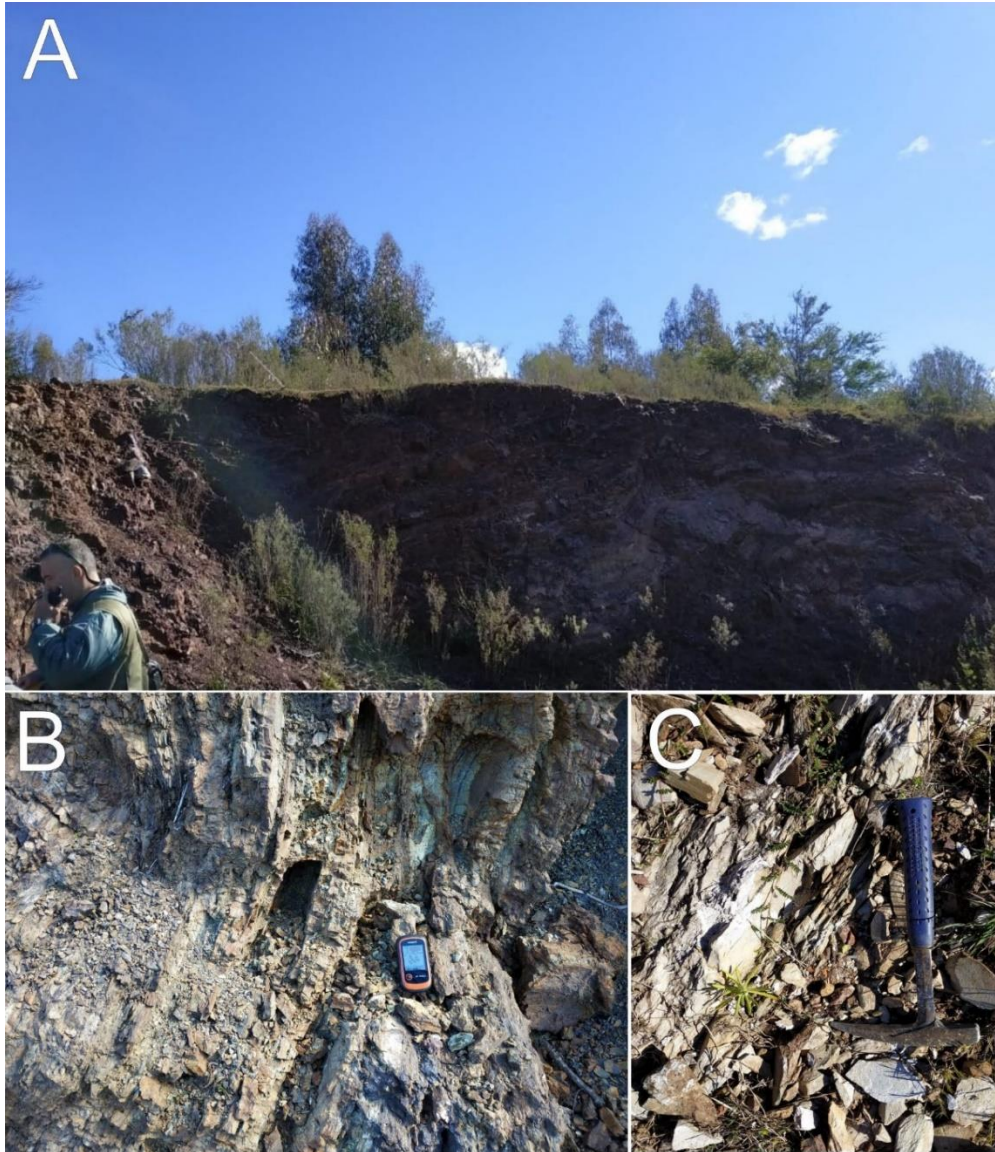
AF6_MN: Afloramiento de pelitas masivas gris azuladas pertenecientes a la Fm Yermal-GAS.



Un tercer afloramiento de esta unidad fue cartografiado en cercanías al casco urbano de Minas, donde se aprecia la intercalación de pelitas grisáceas y BIF, con presencia de magnetita y pirolusita botroidal. Así mismo, unos cuantos metros más adelante del afloramiento, se encontraron vestigios de dolomita, en niveles de 30-50 cm, con estratificación $230^{\circ}/75^{\circ}$, asumiéndose que esta zona corresponde al tope de la Fm Yermal (Figura 13).

Figura 13

AF7_MN: Tope de la Fm Yermal-GAS. (A) Extensión del afloramiento (B) Intercalación de pelitas con BIF (C) Vestigios de dolomita en cercanías del afloramiento.

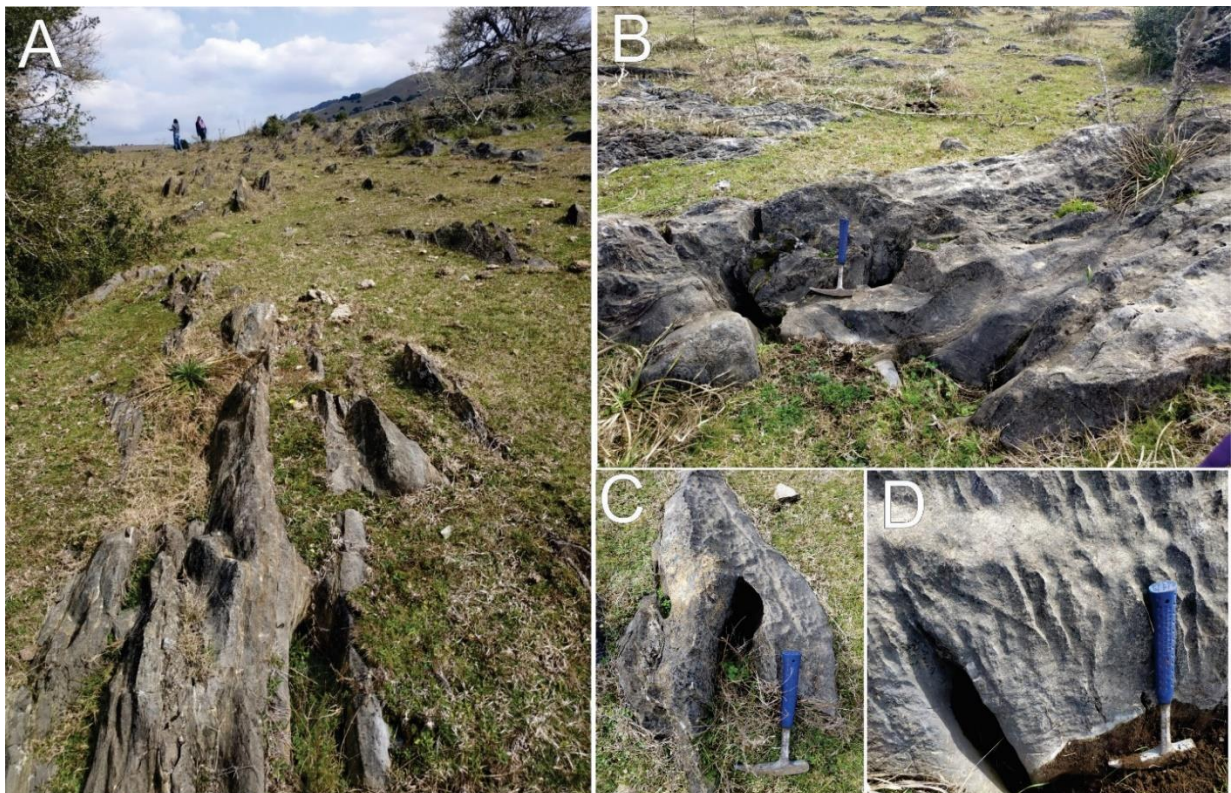


Formación Polanco

En el área de estudio fue cartografiado un afloramiento de calizas dolomíticas grisáceas, de grano fino, afectado por fuertes procesos de disolución (Figura 14). Estos niveles, que se extienden por un terreno de más de 300 metros, generan un intenso modelado kárstico en el paisaje. González (2016) identifica las principales estructuras de disolución formadas en los carbonatos de esta unidad en diversas localidades, en las que se encuentran dolinas tipo taza y tubo, y relieves kársticos de tipo lapiaz con hoyos y nichos cilíndricos. Dato estratificación: 40°/50°.

Figura 14

AF8_MN: Formación Polanco-GAS. (A) Extensión del afloramiento (B, C, D) Evidencias de disolución karstica de los carbonatos que conforman la unidad.



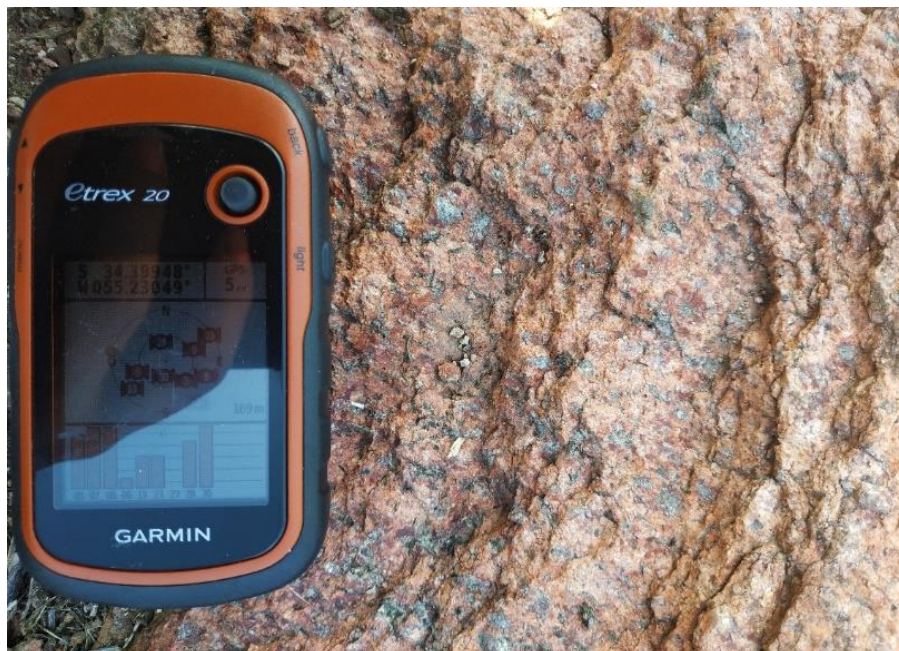
Granito de Minas

El reconocimiento y delimitación de esta intrusión en el área fue posible gracias al análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas, pues la unidad exhibe un contraste, tanto en su expresión topográfica, con un relieve irregular que se destaca con respecto a las zonas contiguas de pendientes suavizadas, como en la erosión y el desarrollo de suelos poco profundos que exponen vestigios de estos materiales en superficie, rasgos que son percibidos con la fotointerpretación.

Un pequeño afloramiento ubicado a las salidas de la ciudad, retomando la ruta Nacional N°12, permitió clasificar litológicamente esta unidad. Se trata de un sienogranito, rico en feldespato potásico, quién le atribuye tonalidades rosas intensas a la muestra, con contenidos menores de cuarzo, plagioclasa y máficos, principalmente láminas de biotita débilmente oxidadas.

Figura 15

AF9_MN: Aspecto macroscópico del sienogranito incluido dentro de la Unidad Granito de Minas.



Un hiato estratigráfico se evidencia en el área desde el Cámbrico, con la intrusión del Granito de Minas, hasta inicios del Mesozoico, donde Álvarez (2020) reconoce sobre el sector W de la ciudad de Minas afloramientos de basaltos masivos, afaníticos, muy alterados con rumbos E-W y buzando en sentido N hacia la cuenca Santa Lucia, y los incluye dentro de la Fm Puerto Gómez, quién reporta una edad Cretácica inferior.

Si bien no fue posible ubicar afloramientos de esta unidad dentro del área de estudio, se cuenta con información de la perforación 80.3.016 Gimenez, realizada por la compañía Obras Sanitarias del Estado (OSE) cuyo registro indica la presencia de basaltos, por lo que se delimita por fotointerpretación una pequeña porción de esta formación hacia el norte.

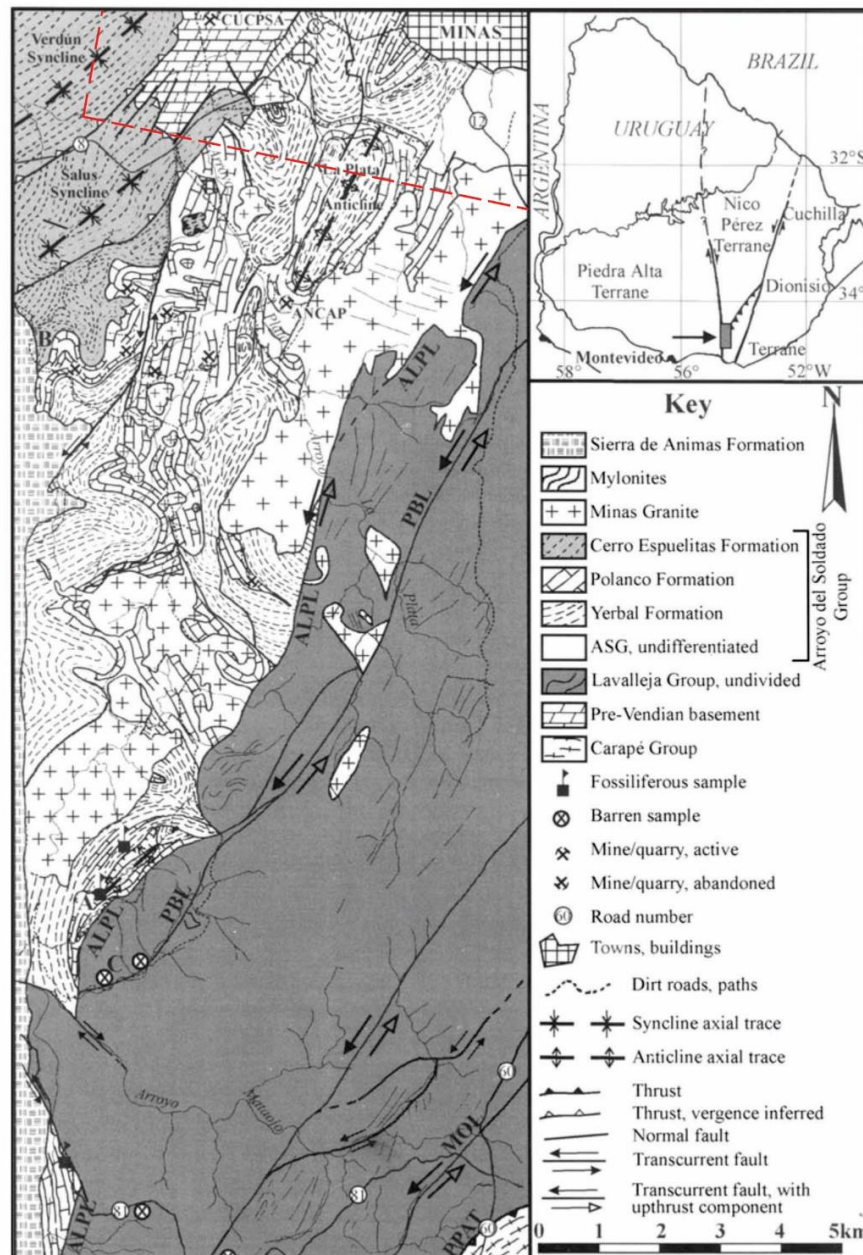
Finalmente, Álvarez (2020) indica la existencia de un coluvión, de edad cuaternaria, al W de Minas, producto de los fenómenos de erosión que afectaron a la litología aflorantes en el cerro Verdún (Fm Yermal-miembro arenoso) y que permitieron la depositación de un espeso registro de bloques, de tamaños variables hasta de 1 metro, transportados y acumulados en las cotas topográficamente más bajas.

3.3 Geología estructural

Álvarez (2020) indica que el evento de deformación con mayor influencia en la zona, y que genera un plegamiento del GAS y de la Fm Las ventanas fue coetáneo a la intrusión del Granito de Minas, y desarrolla las estructuras explicadas a continuación, algunas de ellas reportadas inicialmente por Gaucher et al., (2004) como se expone en la Figura 16. Una porción del área de estudio se incluye bajo esta representación cartográfica.

Figura 16

Mapa geológico del S y SW de la ciudad de Minas. Una porción del área de estudio (recuadro rojo) es delimitada y se encuentra afectada por el Sinclinal Verdún y el Anticlinal La Plata.



Nota. PBL= Lineamiento Peña Blanca; ALP= Lineamiento Arroyo de la Plata, quién apoya el emplazamiento del Granito de Minas en la zona. Tomado y modificado de Gaucher et al., (2004).

En dirección NW-SE la primera estructura es nombrada por Gaucher et al., (2004) como “Sinclinal Verdún” y confirmada por Álvarez (2020) asignándole el nombre de “Sinclinal Fuente Verdún”. La formación Cerro Espuelitas, unidad más joven reportada en la secuencia del GAS, es descrita por Gaucher et al., (2004) en el área, conformando este pliegue.

La siguiente estructura reportada corresponde al Sinclinal Cortéz Blanco, afectada por la intrusión del Granito de Minas, quien también incluye litologías del GAS en su registro con afloramientos de pelitas de la Fm Yermal en los flancos, y secuencias de ritmitas calizas-dolomias incluidas dentro de la Fm Polanco, en el núcleo (Álvarez, 2020). Bajo este mismo concepto, Álvarez (2020) reporta dos nuevos pliegues, el Anticlinal Cuchilla del Portezuelo, con evidencia de calizas de la Fm Polanco en los flancos de la estructura y pelitas y BIF en el núcleo; y el Sinclinal Cañada del Molino, donde en su núcleo fue posible identificar afloramientos de margas y pelitas incluidas dentro de la Fm Cerro Espuelitas.

La última estructura identificada en el área es el Anticlinal La Plata, inicialmente reconocido por Gaucher et al., (2004) con pelitas de la Fm Yermal conformando el núcleo del pliegue y generando una buena exposición del contacto entre las litologías de las Formaciones Yermal y Polanco que lo constituyen.

Las 5 estructuras anteriormente descritas, se encuentran orientadas de manera cuasi paralela, por lo que Álvarez (2020) asume que el evento de deformación en la zona estuvo dominado por esfuerzos compresivos en dirección NE-SW.

3.4 Hidrogeología

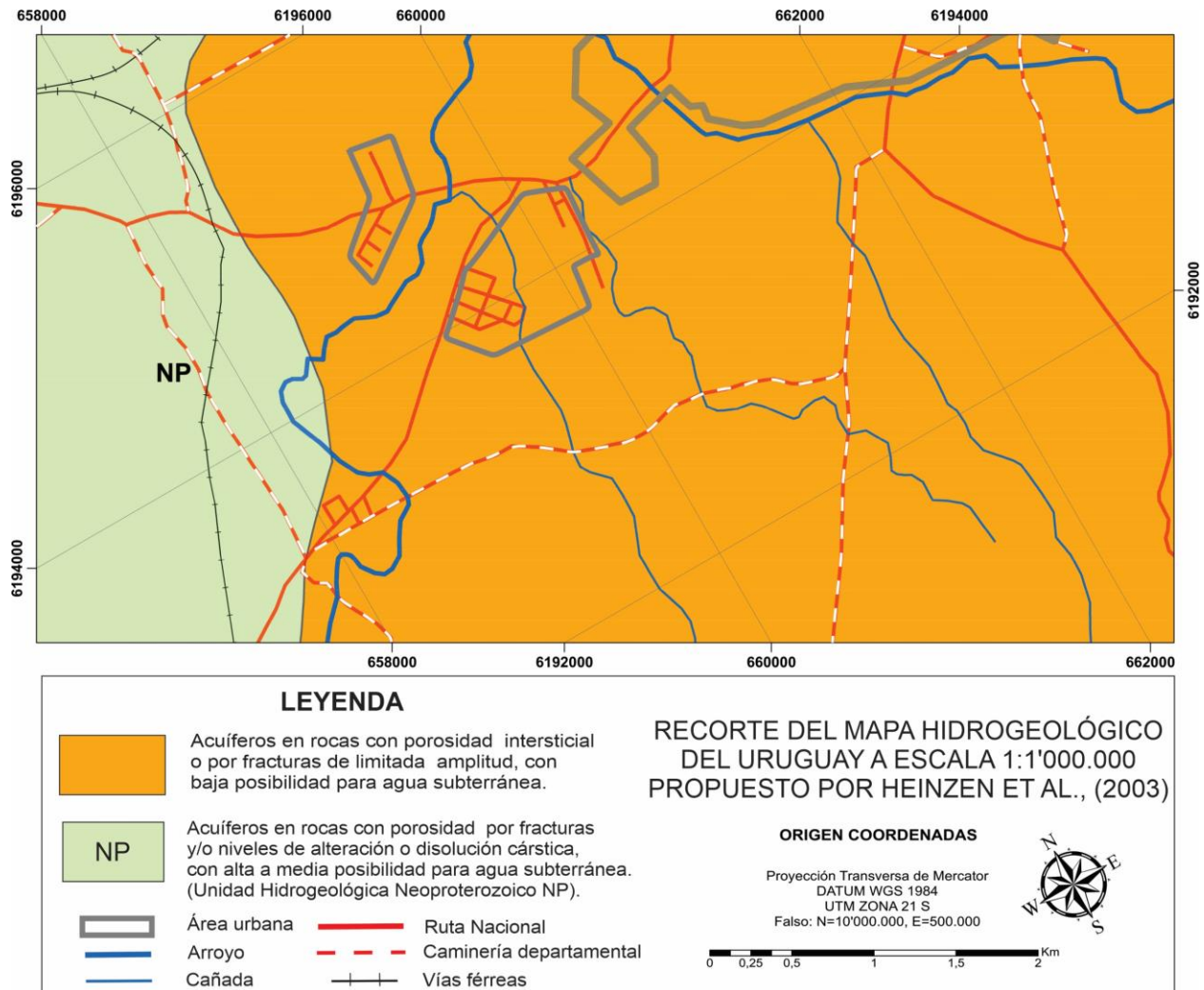
El agua subterránea se ha convertido en un recurso estratégico para grandes sectores económicos del Uruguay, principalmente en la agricultura, ganadería y el abastecimiento humano, y en menor proporción es usada en la industria. Una de las causas de esta transición a la explotación del recurso subterráneo en el país está relacionada con el impacto en la calidad del agua superficial de varios ríos y arroyos por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados que contribuyen al desarrollo agrícola en diferentes regiones (Collazo, 2020).

Gracias a la naturaleza geológica del subsuelo Uruguayo, ha sido posible la explotación del recurso hídrico subterráneo en acuíferos porosos formados sobre unidades geológicas con buena porosidad y permeabilidad que conforman grandes cuencas sedimentarias; por otro lado, más del 50% del territorio lo conforma un basamento cristalino y rocas basálticas, que dada su incidencia de fracturamiento por la importante actividad tectónica a la que se encuentran sometidas estas unidades, así como la generación de mantos de alteración en los macizos aflorantes, permite la formación de acuíferos fisurados donde el agua se almacena y circula a través de diaclasas y fallas interconectadas, y donde la explotación y aprovechamiento del recurso está gobernada por la identificación y ubicación de dichas estructuras portadoras (Montaño et al., 2005).

Según el mapa hidrogeológico del Uruguay a escala 1:1'000.000 publicado por la Dirección Nacional de Minería y Geología DINAMIGE en el año 2003, la región de Minas se incluye en dos divisiones hidrogeológicas como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Recorte del mapa hidrogeológico del Uruguay a escala 1:1'000.000.



Nota. Tomado y adaptado de Heinzen et al., (2003).

El sector NW del área de estudio se incluye en la categoría de rocas con porosidad por fracturas y/o niveles de alteración o disolución carstica con alta o media posibilidad para agua subterránea, y se subclasifica dentro de la unidad hidrogeológica del Neoproterozoico (NP), con caudales específicos menores a 0.50 m³/h/m, compuesta de esquistos, micaesquistos, bancos y

lentes de calizas y dolomias, filitas, cuarcitas, metaareniscas, anfibolitas, neises y granitos; hacia el sector SE, la zona se incluye en la categoría de rocas con porosidad intersticial, o por fracturas de limitada amplitud con baja posibilidad para albergar agua subterránea, y refiere a aquellas rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas con importancia hidrogeológica muy reducida a causa de su composición mineralógica (Heinzen et al., 2003). En esta clasificación hidrogeológica se incluye la unidad del Neoproterozoico Grupo Arroyo del Soldado, quién fue extensamente cartografiada en el área y gran parte de las formaciones que la componen se comportan como acuíferos fisurados con el dominio de porosidad secundaria.

Por su parte, González (2016) analiza el comportamiento hidrogeológico de las Formaciones Polanco, Yermal y Cerro Espuelitas definidas dentro del GAS. Así pues, recalca el avance en términos de explotación de agua mineral en los carbonatos de la Formación Polanco, pues la calidad del recurso ha despertado el interés de empresas nacionales e internacionales. Por otra parte, define a las formaciones Yermal y Cerro Espuelitas como niveles impermeables hidrogeológicamente, el primero desarrollando depresiones en superficie que permiten la formación de cuerpos de agua temporales.

4. Marco legal

MIDES (2015) aborda el problema actual de la calidad del recurso hídrico en el país señalando que uno de los principales problemas ambientales asociados al mal manejo de los residuos corresponde a la percolación y vertido de lixiviados al suelo, el subsuelo y a los cursos de agua, pues el agua de lluvia y los líquidos contenidos en los residuos se mezclan, reaccionan y

se cargan de metales tales como plomo, cadmio y cromo, continuando su curso normal hacia la alimentación de redes hídricas superficiales o acuíferos.

Obras Sanitarias del Estado OSE es la compañía estatal Uruguay encargada del abastecimiento de agua potable y de prestar los servicios de saneamiento en el interior del país desde el año 1952 a excepción de la ciudad capital Montevideo, suministrando un 28% del total del recurso a través de la explotación de acuíferos (OSE, 2020). La Norma Interna de Calidad de Agua Potable dictaminada por esta Institución en el año 2006, establece parámetros y valores máximos admitidos en el control del consumo directo o indirecto del agua que permitan prevenir riesgos en la salud de la población por la adquisición del recurso. Se apoya en el Reglamento Bromatológico Nacional (Ministerio de Salud Pública de Uruguay, Decreto 315, 1994) que a su vez tiene como base los parámetros establecidos en el Decreto 253/79 (Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Uruguay, Decreto 253, 1979) para determinar la aptitud del agua destinada al consumo humano y al riego en el territorio.

Bajo esta premisa, y teniendo en cuenta los principales usos del recurso referidos por Collazo (2020), el agua subterránea se incluye inicialmente en dos categorías según la clasificación de aguas proclamada en el Decreto 253/79, así:

Clase 1: Aguas destinadas o que pueden ser destinadas al abastecimiento de agua potable a poblaciones con tratamiento convencional.

Clase 2a: Aguas destinadas al riego de hortalizas o plantas frutícolas, u otros cultivos destinados al consumo humano en su forma natural, cuando éstas son usadas a través de sistemas de riego que provocan el mojado del producto.

Según el Reglamento Bromatológico Nacional es necesario contar con la certificación de potabilidad de los depósitos de agua subterránea como mínimo cada seis meses. El agua de pozos, manantiales y aljibes se incluye dentro de la calificación de “agua potable”, apta para la alimentación y uso doméstico o de industrias alimentarias siempre que cumpla con los caracteres sensoriales, fisicoquímicos, biológicos y microbiológicos establecidos en la normativa vigente. La Tabla 1 resume los principales parámetros fisicoquímicos para el agua potable en Uruguay.

Tabla 1

Resumen de los principales parámetros fisicoquímicos establecidos para el agua potable en Uruguay.

Parámetros fisicoquímicos del agua potable en Uruguay	
PH	6-9
Residuo seco a 180°C	Max 1 g/l
Dureza total en CaCO ₃	Max 500 mg/l
Cloruros	Max 300 mg/l
Sulfatos	Max 400 mg/l
Cobre	Max 1 mg/l
Manganeso	Max 0.1 mg/l
Aluminio	Max 0.5 mg/l
Hierro	Max 0.3 mg/l
Zinc	Max 5 mg/l
Sodio	Max 200 mg/l
Fósforo como P ₂ O ₅	Max 0.4 mg/l
Nitratos como N	Max 10 mg/l
Nitritos como NO ₂	Max 1.5 mg/l
Sólidos totales disueltos	700 mg/l
Turbidez	Max 5 UNT

Nota. Tomado y adaptado del Reglamento Bromatológico Nacional (Ministerio de Salud Pública de Uruguay, Decreto 315, 1994; Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Uruguay, Decreto 253, 1979)

5. Marco teórico

La vulnerabilidad intrínseca o natural de las aguas subterráneas se define como la susceptibilidad a la que se encuentra expuesto el sistema acuífero frente a una carga contaminante independientemente de su naturaleza, y se encuentra ligada a la capacidad de atenuación de los estratos que subyacen la zona saturada y de la dinámica del flujo subterráneo y el contaminante por el acuífero (De Maio et al., 2001).

La evaluación de la vulnerabilidad actualmente se apoya en los sistemas de información geográfica (SIG), un conjunto de herramientas eficaces en el procesamiento de bases de datos de los diferentes métodos de zonificación consolidados y en el análisis de relaciones espaciales y físicas de los elementos ambientales en cuestión para una correcta planificación y ordenamiento territorial (Gogu, 2000).

La efectividad en los resultados obtenidos con el desarrollo de una zonificación de vulnerabilidad acuífera requiere, en primera medida, de la evaluación a detalle de las características hidrogeológicas, climatológicas y topográficas que dominan el área de interés, con el fin de contrastar las diferentes metodologías existentes y evaluar la idoneidad de las variables que contienen, pues si bien dichos métodos comparten algunos datos o capas temáticas en cuestión, la ponderación y álgebra de los mapas es trabajada con diferentes enfoques y a diferentes escalas de acuerdo a experiencias de autores que han desarrollado estas metodologías y que han logrado la estandarización de las mismas para su correcta aplicación y difusión en diferentes escenarios.

Dichos autores han agrupado los métodos de vulnerabilidad en cuatro categorías: (1) Modelos de simulación, utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica por medio de

la simulación numérica de procesos de transporte de contaminantes; (2) Modelos estadísticos, que expresan la vulnerabilidad como la probabilidad de contaminación a partir del desarrollo de un análisis estadístico entre la contaminación presente, las condiciones ambientales y el uso del suelo; (3) Métodos de superposición e índices, o también llamados métodos paramétricos, utilizados en el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, se basan en la combinación de diferentes parámetros los cuales poseen una puntuación cuantitativa y a su vez un valor de ponderación específico dando como resultado un índice numérico de vulnerabilidad; finalmente (4) Ambientes hidrogeológicos, métodos usados cuando se cuenta con poca información, pues evalúa cualitativamente la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos a partir de la superposición de mapas temáticos (Vargas Quintero, 2010).

De acuerdo con las diferentes propuestas consultadas, se infiere que métodos como EPIK, PI y COP están íntimamente relacionados con la evaluación de acuíferos kársticos; limitando así la posibilidad de evaluar correctamente la vulnerabilidad en otro tipo de acuíferos. Por otra parte, el método AVI presenta una limitante en los parámetros a utilizar para la construcción del modelo pues la obtención de conductividades hidráulicas verticales en jornadas de campo no es una variable contemplada en este estudio por la falta de herramientas para efectuar dicha medición. Finalmente, se presta especial atención a los métodos de índice y superposición GOD, DRASTIC Y SINTACS, pues consideran un escenario más amplio para la evaluación de diferentes tipos de acuíferos, siendo GOD la metodología más práctica de aplicación; y SINTACS un modelo mejorado del método DRASTIC que incluye en su procesamiento la evaluación y ponderación de criterios antrópicos con mayor detalle.

Al evaluar un mismo acuífero con diferentes métodos de vulnerabilidad, los resultados pueden ser diferentes y la validez de los mismos relativa, pues depende de la cantidad, calidad y

disponibilidad de datos para su tratamiento (Vargas Quintero, 2010). Por esta razón, en el presente estudio se desarrolla la zonificación por el método GOD y el método SINTACS con el fin de comparar la validez y coherencia de los resultados obtenidos con ambas metodologías.

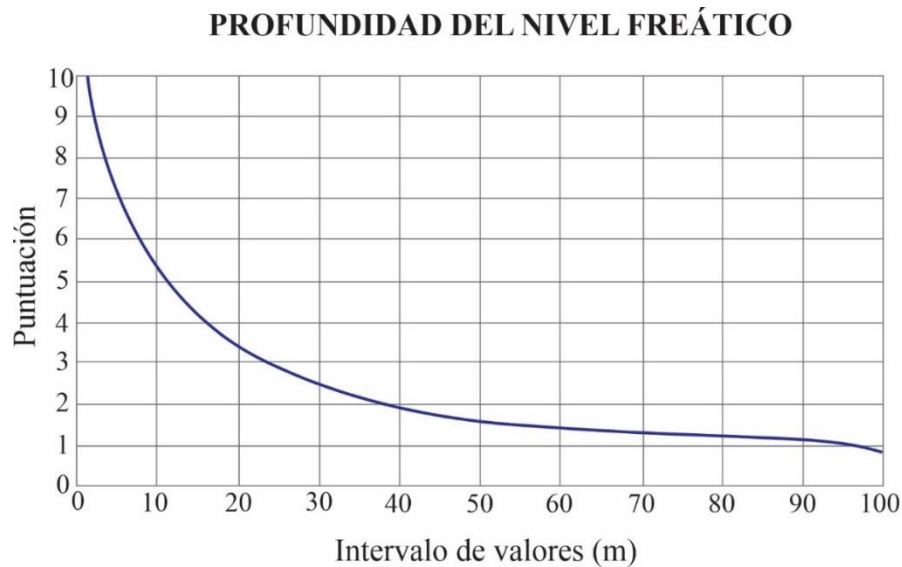
5.1 Método SINTACS

Modelo de zonificación que incluye la integración y procesamiento de un complejo conjunto de parámetros hidrológicos, hidrogeológicos y topográficos, en los que destaca la naturaleza del sistema (composición del suelo, de la zona vadosa y de la zona saturada), y el análisis de recarga del acuífero; variables que requieren de continuidad y densidad de información y de validez de los datos, con el fin de asignar correctamente las puntuaciones y pesos que describan la o las situaciones de impacto que se manifiestan en el área, contexto obtenido por medio de registros históricos, jornadas de campo y ensayos in situ (De Maio et al., 2001).

Parámetro S- Profundidad del nivel freático: La profundidad del agua subterránea está relacionada al nivel freático medido en los acuíferos libres y al techo de los acuíferos confinados, donde el índice de vulnerabilidad hidrogeológica será menor a medida que aumenta el espesor de la zona no saturada que actúa como nivel de atenuación de cargas contaminantes por degradación o retención natural; permitiendo así encontrar niveles freáticos a mayor profundidad, y como consecuencia un tiempo de tránsito más prolongado del contaminante hasta llegar a la zona saturada y producir una afectación (Vargas Quintero, 2010).

Figura 18

Capa S-Profundidad del nivel freático por el método SINTACS.



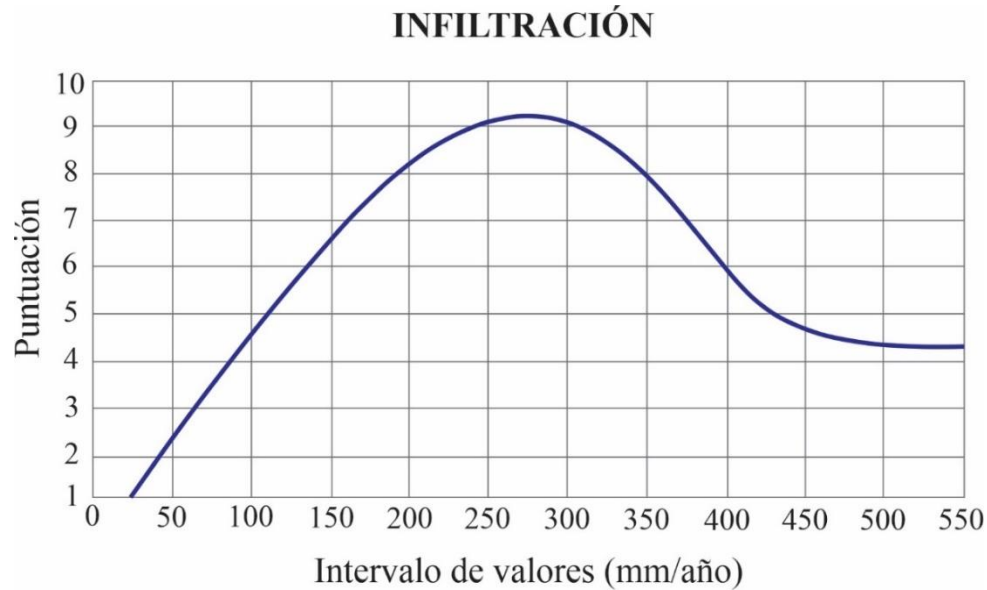
Nota. Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Parámetro I- Infiltración: La recarga de un acuífero se define como el proceso mediante el cual una porción de la precipitación logra infiltrarse en el suelo, drenar a través de las capas no saturadas y llegar a formar parte del agua subterránea (Quiroz et al., 2012); entendida de igual forma como la diferencia entre la precipitación total y la porción de agua que se pierde por escorrentía directa y evapotranspiración real efectiva (Al Kuisi et al., 2006).

La recarga se convierte en un medio para la lixiviación y el transporte de contaminantes y sales; altos volúmenes de recarga y poco espesor de la zona no saturada podrían apoyar el fácil transporte de dichas cargas y contaminar el acuífero (Vargas Quintero, 2010).

Figura 19

Capa I- Infiltración por el método SINTACS.

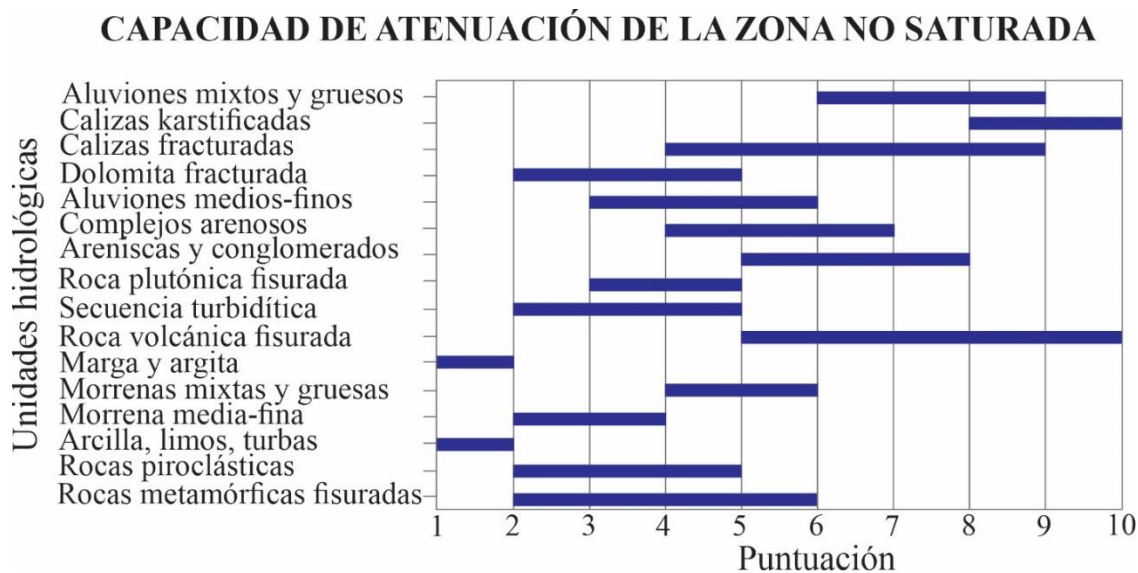


Nota. Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Parámetro N- Capacidad de atenuación de la zona no saturada: Se le denomina zona no saturada al espesor entre la base del suelo y el área saturada del acuífero (De Maio et al., 2001). Las características de la zona no saturada son fundamentales en la estimación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, pues su espesor, naturaleza litológica y dinámica estructural posibilita procesos de atenuación, actuando como defensa natural del acuífero contra los contaminantes (Vargas Quintero, 2010).

Figura 20

Capa N- Capacidad de atenuación de la zona no saturada por el método SINTACS.

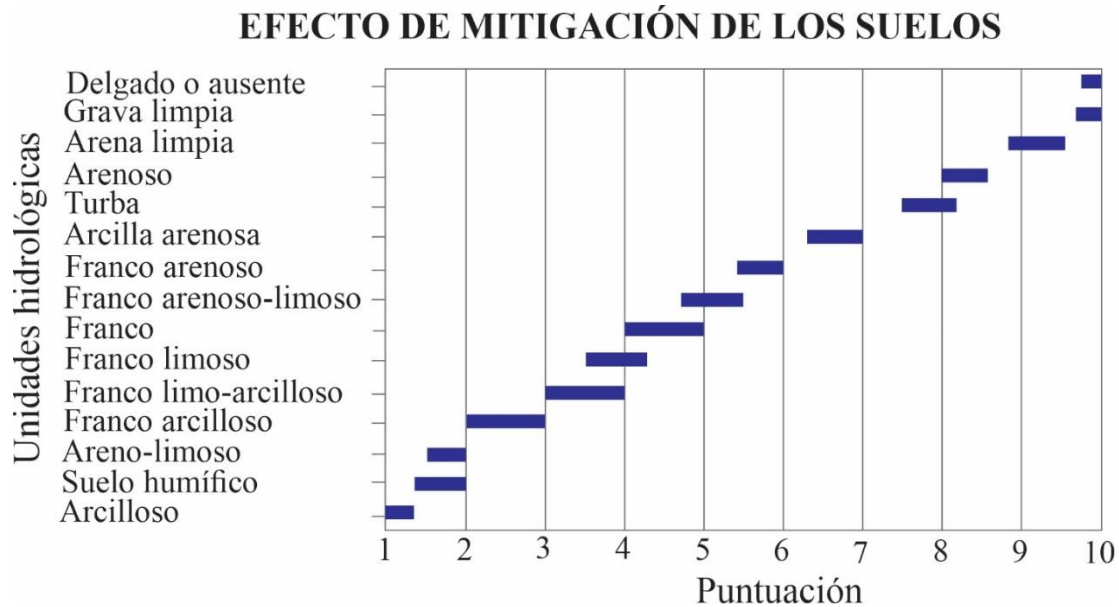


Nota. Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Parámetro T- Efecto de mitigación de los suelos: El suelo se convierte en la primera línea de defensa que posee el sistema acuífero ante los contaminantes (De Maio et al., 2001). Su función de atenuación, de acuerdo con su condición textural y composicional, impacta significativamente tanto la cantidad de recarga que logra infiltrarse en el suelo, así como la carga contaminante inmersa que se transporta verticalmente hacia la zona vadosa (Al Kuisi et al., 2006).

Figura 21

Capa T- Efecto de mitigación de los suelos por el método SINTACS.

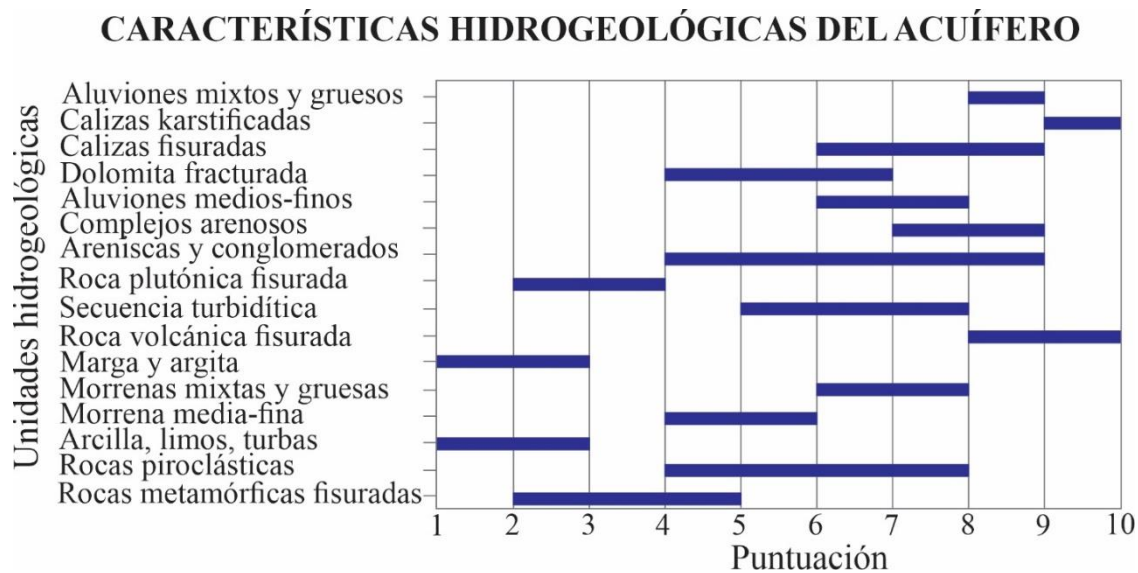


Nota. Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Parámetro A- Características hidrogeológicas del acuífero: La tipología del acuífero marca un precedente en el entendimiento de los procesos de dispersión, dilución, absorción y reactividad química entre el agua subterránea, los contaminantes y las rocas que constituyen la zona saturada (Al Kuisi et al., 2006). Depende tanto del tipo de litología como de la permeabilidad del acuífero, pues en medios porosos esta propiedad es evaluada a partir del tamaño de grano y el grado de compactación, mientras que en acuíferos fisurados se clasifica mediante el desarrollo de fracturas y/o karst en las rocas (De Maio et al., 2001).

Figura 22

Capa A- Características hidrogeológicas del acuífero por el método SINTACS.

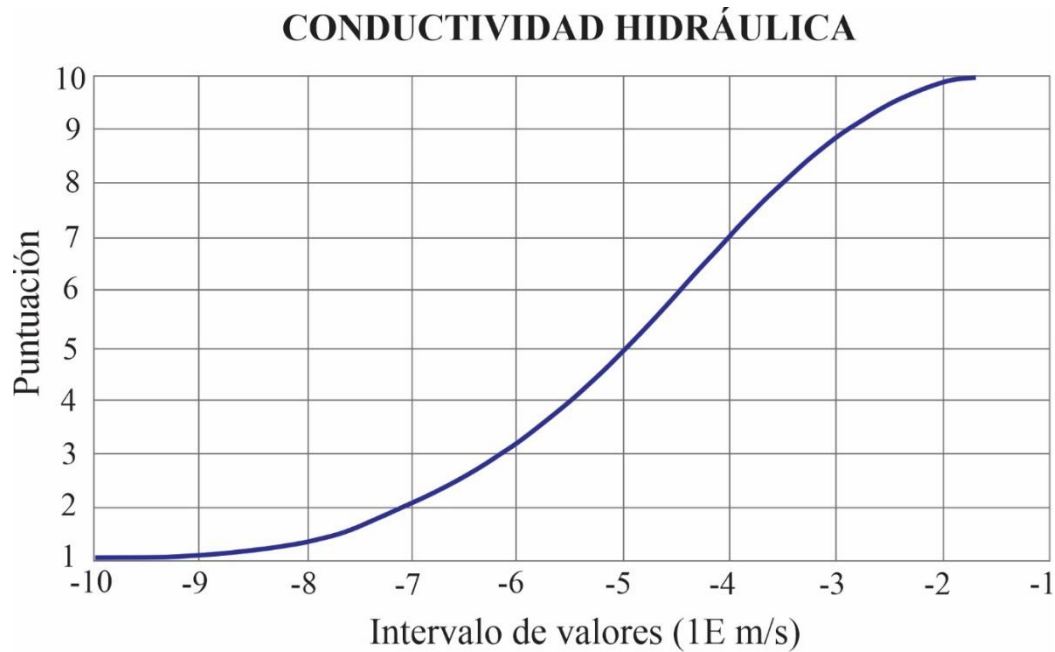


Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Parámetro C- Conductividad hidráulica: La conductividad hidráulica, evaluada como un parámetro de velocidad, corresponde a la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección (Vargas Quintero, 2010). Entendida además como la capacidad de desplazar tanto el agua subterránea, los contaminantes inmersos en él, así como otras cargas contaminantes con igual densidad que el agua, por el medio saturado (De Maio et al., 2001).

Figura 23

Capa C- Conductividad hidráulica por el método SINTACS.

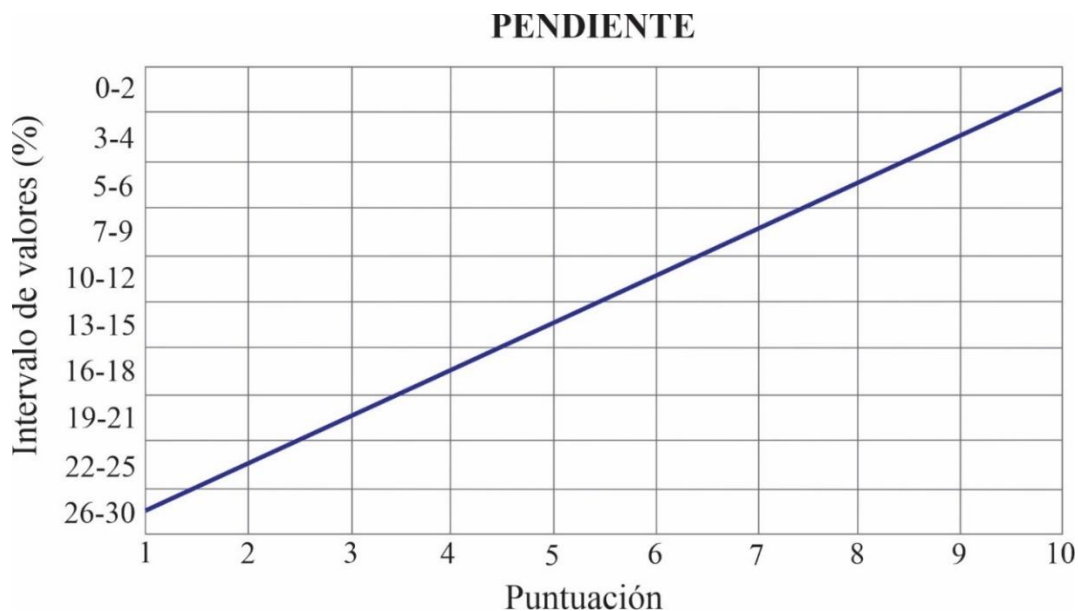


Nota. Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Parámetro S- Pendientes: La topografía es una variable de gran interés en la estimación de la vulnerabilidad hidrogeológica debido a que la pendiente del terreno determina la capacidad de evacuar, por medio de la escorrentía, a una porción de los contaminantes mezclados con las aguas de precipitación antes de iniciar la infiltración; o por el contrario, dichas variaciones de la superficie pueden establecer condiciones favorables para el estancamiento, infiltración y/o evapotranspiración del recurso (Vargas Quintero, 2010).

Figura 24

Pendiente por el método SINTACS.



Nota. Tomado y adaptado de De Maio et al., (2001).

Con lo anterior, se comprueba que el método SINTACS asigna una puntuación de 1 a 10 para cada uno de los parámetros que lo integran; estas variables a su vez poseen un criterio adicional de ponderación incluido por medio de una zonificación de escenarios. Así pues, el método considera la evaluación de 5 situaciones discriminadas por características socioambientales, hidrológicas y geológicas de la región en estudio (Estrada et al; 2013), quienes son descritas con mayor detalle por De Maio et al., (2001) como se muestra a continuación:

1- *Impacto normal (IN)*: Se incluye en esta clasificación las zonas donde no se destaca un impacto negativo en el paisaje por actividades antrópicas, pues son áreas estériles, sin cultivar o

que poseen cultivos los cuales no requieren, o es mínimo el uso de pesticidas y fertilizantes químicos para su desarrollo y producción.

2- *Impacto relevante (IR)*: Corresponde a las áreas sujetas a presentar afectación en el recurso subterráneo por la existencia de fuentes difusas de contaminación potencial, en las que se incluye la antropización extensiva, el incorrecto manejo de aguas residuales y otros servicios de saneamiento, la implementación de cultivos extensivos que requieren el tratamiento con plaguicidas y otros fertilizantes químicos, así como zonas industriales activas y abandonadas, vertederos y oleoductos, entre otros.

3- *Drenaje (D)*: Comprende las áreas donde existe una red hidrográfica continua natural y/o artificial, que apoya la conexión con el acuífero; en esta clasificación además se incluye las planicies de inundación y las áreas de riesgo con grandes volúmenes de agua.

4- *Carstico (C)*: En este escenario se incluyen aquellas áreas fuertemente karstificadas en superficie y en profundidad, en las que se distinguen rápidas conexiones entre la superficie y el acuífero a través de pozos kársticos, sumideros, entre otros.

5- *Fisurado (F)*: Comprende las zonas donde el sistema hidrogeológico lo conforman rocas afectadas por un fuerte control estructural; característica que les atribuye una buena permeabilidad por su incidencia de fracturamiento.

Cada condición presenta un peso multiplicador estipulado en un rango de 1 a 5 dependiendo de la capa evaluada en el método, como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2

Pesos asignados para los escenarios de ponderación del método SINTACS.

Cadena de pesos multiplicadores método SINTACS					
Factor	Impacto Normal (IN)	Impacto Relevante (IR)	Drenaje (D)	Cárstico (C)	Fisurado (F)
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4
Σ	26	26	26	26	26

Nota. Tomado y adaptado de (De Maio et al., 2001).

Con lo anterior, el valor índice de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS es calculado a través de la expresión:

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i W_i \quad (1) \quad (\text{De Maio et al., 2001})$$

Donde P es la puntuación asignada a cada uno de los 7 parámetros, y W el peso relativo de cada escenario identificado.

Finalmente, con la integración de estas variables y su respectiva ponderación en un álgebra de mapas se obtiene un valor numérico de vulnerabilidad intrínseca para el o los acuíferos de

referencia con una puntuación que varía entre 26 y 260 pts. Los niveles de clasificación se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Niveles de clasificación de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS.

Rangos de vulnerabilidad intrínseca método SINTACS		
Símbolo	Clase	Rango
EA	Extremadamente alta	210-260
MA	Muy alta	186-210
A	Alta	140-186
M	Media	105-140
B	Baja	80-105
MB	Muy baja	26-80

Nota. Tomado y adaptado de (De Maio et al., 2001).

5.2 Método GOD

GOD es una metodología que estima el riesgo de contaminación de un acuífero en escenarios con escasez de datos y poca confiabilidad de los mismos (Foster, 1987 en Ruiz y Martinez, 2015).

Posteriormente, Foster e Hirata (1991) reafirman la importancia de desarrollar un esquema práctico de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca que permita la reducción y simplificación de las variables a utilizar, con datos probablemente disponibles o fácilmente recolectados. Por ello, se propuso la indexación de tres parámetros, quienes son explicados en detalle a continuación:

Parámetro G- Groundwater occurrence: Variable relacionada al grado de confinamiento hidráulico del acuífero, clasificándose por medio de su tipología en ausente, artesiano, confinado,

semiconfinado, cubierto y libre, índice que varía en una puntuación de 0 a 1, siendo los acuíferos libres, el modo de ocurrencia que mayor grado de vulnerabilidad a la contaminación presenta según lo dictamina este parámetro (Vargas Quintero, 2010).

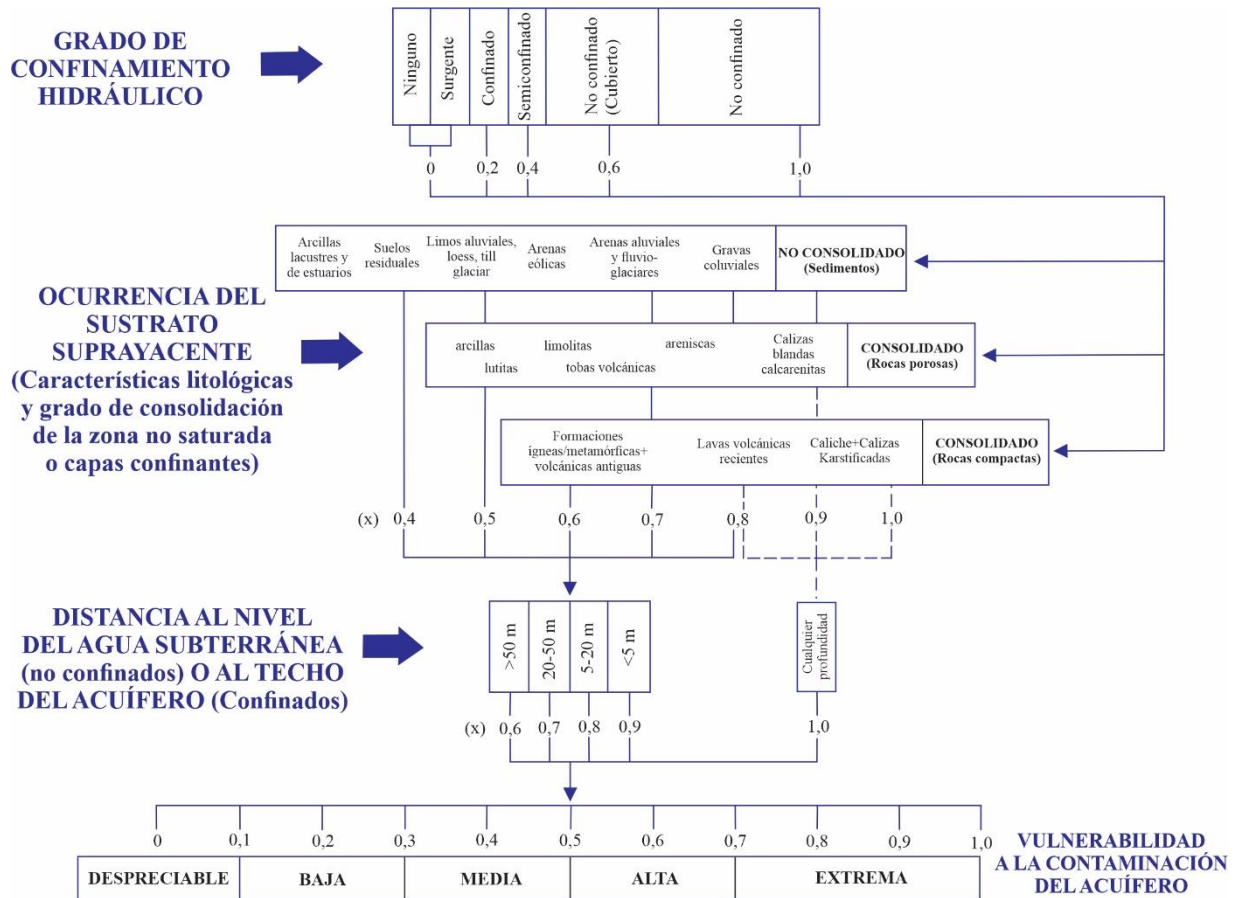
Parámetro O- Overall aquifer class: Refiere a la caracterización de los estratos que constituyen la zona no saturada del acuífero en términos de su litología y grado de consolidación, donde indirectamente se evalúa su porosidad relativa, permeabilidad y contenido de humedad, variables que apoyan el transporte de las cargas contaminantes por la rocas que componen la zona vadosa hasta llegar a la zona saturada del acuífero (Foster e Hirata, 1991). Así pues, presentan índices de vulnerabilidad más bajos (0,4) los sedimentos y estratos consolidados de rocas porosas composicionalmente ricos en arcillas y limos, por su buena capacidad de atenuación; mientras que los rangos de puntuación más altos corresponden a los niveles sedimentarios de origen calcáreo afectados por procesos de fisuración y karstificación que pueden contribuir al movimiento vertical del contaminante por medio de dichas fracturas.

Parámetro D- Depth: Corresponde a la evaluación de la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo de los acuíferos confinados, parámetro anteriormente descrito en el método de vulnerabilidad SINTACS. Para este caso, se cuenta con índices de puntuación entre 0,6 y 1, el más bajo es denotado para aquellos acuíferos con profundidades mayores a 50 metros, y el rango más alto (1) es adoptado en una condición donde independientemente de la profundidad, si el acuífero es definido como karstico y/o fracturado, toma este valor en el modelo (Vargas Quintero, 2010).

El índice de vulnerabilidad acuífera por el método GOD se obtiene con el producto de los componentes mencionados y se resume con la siguiente expresión:

Figura 25

Pesos asignados a las variables que componen el método de vulnerabilidad hidrogeológica GOD.



$$iV_{GOD} = G \times O \times D \quad (2)$$

Nota. Tomado y adaptado de Vargas Quintero (2010).

5.3 Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas

La hidrogeoquímica es una rama de la geología que se encarga del estudio de la química del agua superficial y subterránea, evaluando las reacciones que surgen producto de la interacción de agua/roca en diferentes escenarios geológicos (Árcega Santillán, 2010).

Además de los datos composicionales de iones mayoritarios y minoritarios en las aguas, el estudio hidroquímico incluye la medición de parámetros fisicoquímicos in situ como la temperatura, el PH, la conductividad eléctrica, la resistividad eléctrica, los sólidos totales disueltos STD, el potencial redox y la turbidez. Estos parámetros contribuyen al conocimiento e interpretación del origen, distribución y calidad del agua, aportando información sobre la evolución espacio-temporal del acuífero que permita detectar afectaciones, evaluar la vulnerabilidad del mismo frente a un agente contaminante y establecer medidas de mitigación y gestión del recurso (Lillo, 2007).

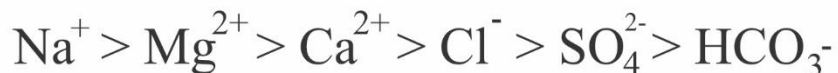
Figura 26

Secuencia de Chebotarev.

Secuencia normal de un agua joven de reciente infiltración



Secuencia de un agua evolucionada con un largo tiempo de residencia

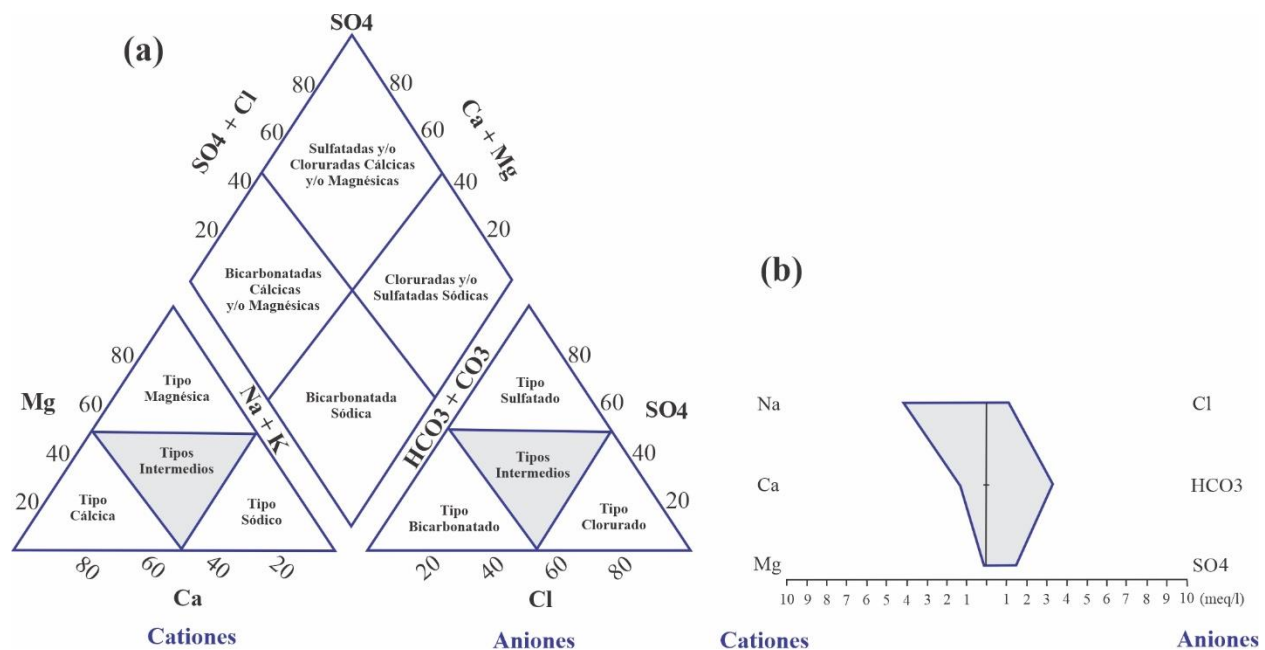


Nota. Tomado y adaptado de Lillo (2007).

La secuencia de Chebotarev (Figura 26), indica la evolución del agua subterránea por medio del análisis de la composición iónica que varía a lo largo del tiempo de residencia en el sistema. De esta manera, se infiere que las aguas menos evolucionadas, de reciente infiltración, corresponden a aguas bicarbonatadas formadas a partir de la mezcla de agua de precipitación y dióxido de carbono; y transicionan hacia aguas cloruradas, más evolucionadas y con mayor tiempo de residencia dentro del acuífero lo que contribuye a una fuerte interacción de éstas aguas con las rocas del subsuelo (Árcega Santillán, 2010). Las representación gráfica de dicha distribución de cationes y aniones mayoritarios en las aguas superficiales y subterráneas ha sido trabajada por distintos autores y se han desarrollado un conjunto de diagramas de clasificación de aguas, entre los que se encuentra el diagrama de Piper y el diagrama de Stiff (Figura 27).

Figura 27

Diagramas de clasificación de aguas (a) Diagrama de Piper (b) Diagrama de Stiff.



Nota. Tomado y adaptado de Árcega Santillán (2010).

(a) Diagrama de Piper: Diagrama trilineal múltiple compuesto por dos campos triangulares donde se grafican los valores porcentuales de la concentración obtenida en meq/l para los grupos catiónicos (Ca, Mg, Na) en la figura izquierda, y para el grupo de aniones (HCO_3 , SO_4 , Cl) en el extremo derecho; el campo central en forma de diamante es rellenado a partir de la intersección de los rayos proyectados de los esquemas anteriores y se utiliza para mostrar el carácter químico general del agua, indicando la composición relativa en términos de pares catión-anión agrupando las aguas en distintas familias hidrogeoquímicas (Piper, 1944).

(b) Diagrama de Stiff: Sistema de clasificación compuesto por un punto 0 ubicado como línea vertical y de donde parten una serie de líneas horizontales que se extienden a la izquierda graficando los cationes y hacia el extremo derecho graficando los aniones, ambos con concentraciones en meq/l, formando así un polígono mediante la conexión de los valores de cada ión; figuras que presentan variaciones en su forma y tamaño, y que son identificadas y catalogadas de acuerdo a los patrones establecidos en este sistema para cada tipo de agua (Stiff, 1951).

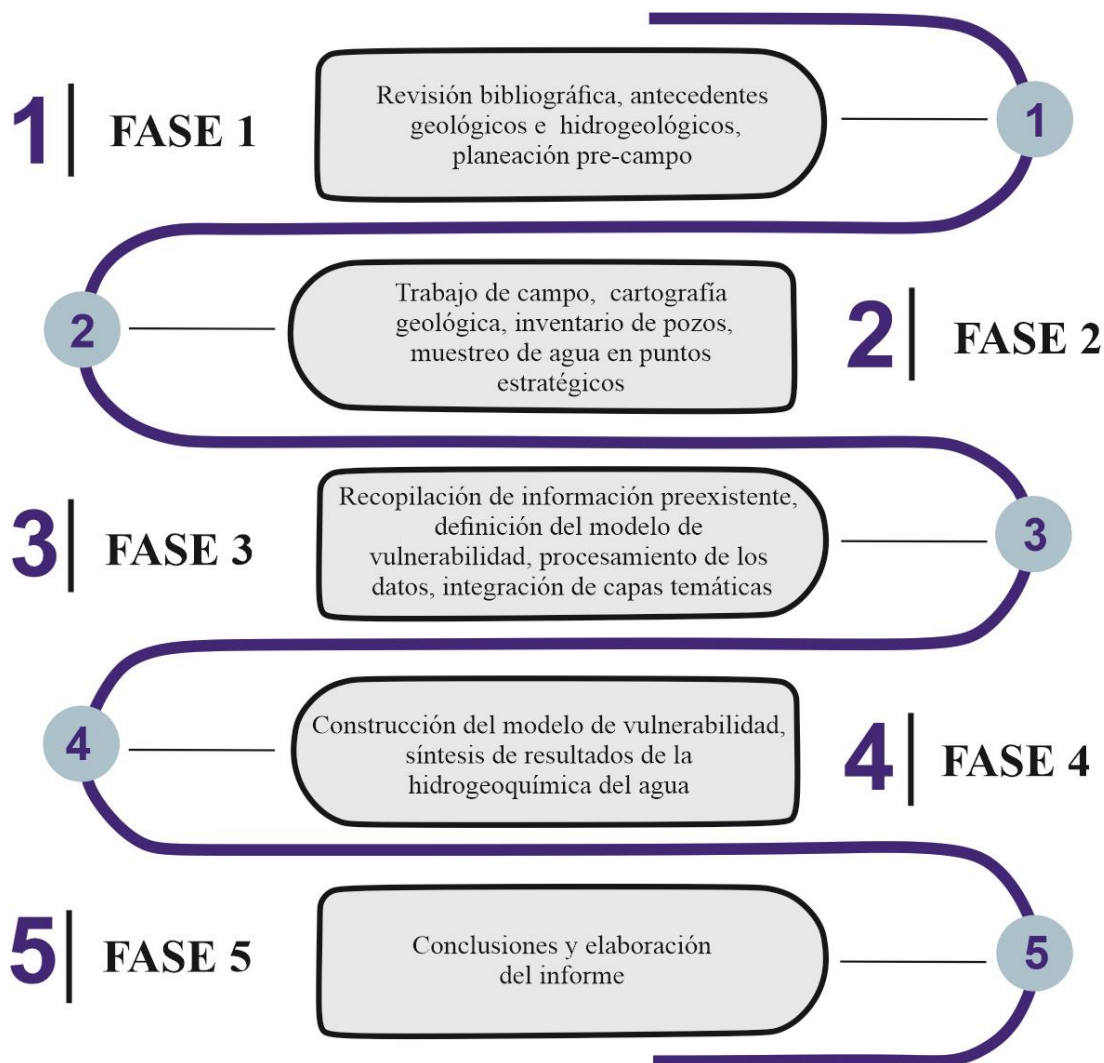
6. Metodología

La aplicación de modelos de zonificación que permitan calificar el grado de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación de acuerdo a sus características intrínsecas; y el análisis fisicoquímico del agua, que incluya una interpretación en detalle de la tendencia y distribución de iones mayoritarios así como otros parámetros medibles in situ, constituyen una poderosa herramienta para la representación y zonificación de la sensibilidad del recurso a una alteración de su calidad inicial y a su vez, marca un precedente para la correcta planificación, gestión y protección del agua en puntos críticos. La metodología llevada a cabo para lograr ese fin comprende, en primera medida, el reconocimiento del problema a través de la consulta y compilación de información de la temática a estudiar para establecer los fundamentos, los conceptos y el estado del conocimiento en la materia para su posterior tratamiento, discusión, comparación y síntesis de resultados. El alcance del proyecto se enmarca en la elaboración de un mapa de vulnerabilidad hidrogeológica único por cada modelo propuesto, que permita la interpretación del comportamiento actual de los acuíferos presentes en la región de interés y su índice potencial a la contaminación. No incluye una comparación espacio-temporal en diferentes periodos. La consolidación de las capas temáticas de los métodos SINTACS y GOD se llevó a cabo en una serie de fases, donde se incluye la utilización de herramientas y ecuaciones para la obtención de las variables requeridas en el modelo.

La Figura 28 muestra una síntesis de las etapas previamente definidas para el desarrollo metodológico de la investigación.

Figura 28

Esquema metodológico del proyecto de investigación.



Fase 1: En esta etapa se llevó a cabo la búsqueda detallada de información acorde a la temática trabajada; incluyendo los antecedentes geológicos e hidrogeológicos de la región, además de ejecutar la preparación para las jornadas de campo próximas, realizando la delimitación del área de trabajo, conociendo las rutas de acceso y demás información relevante obtenida de imágenes satelitales y cartas topográficas del área.

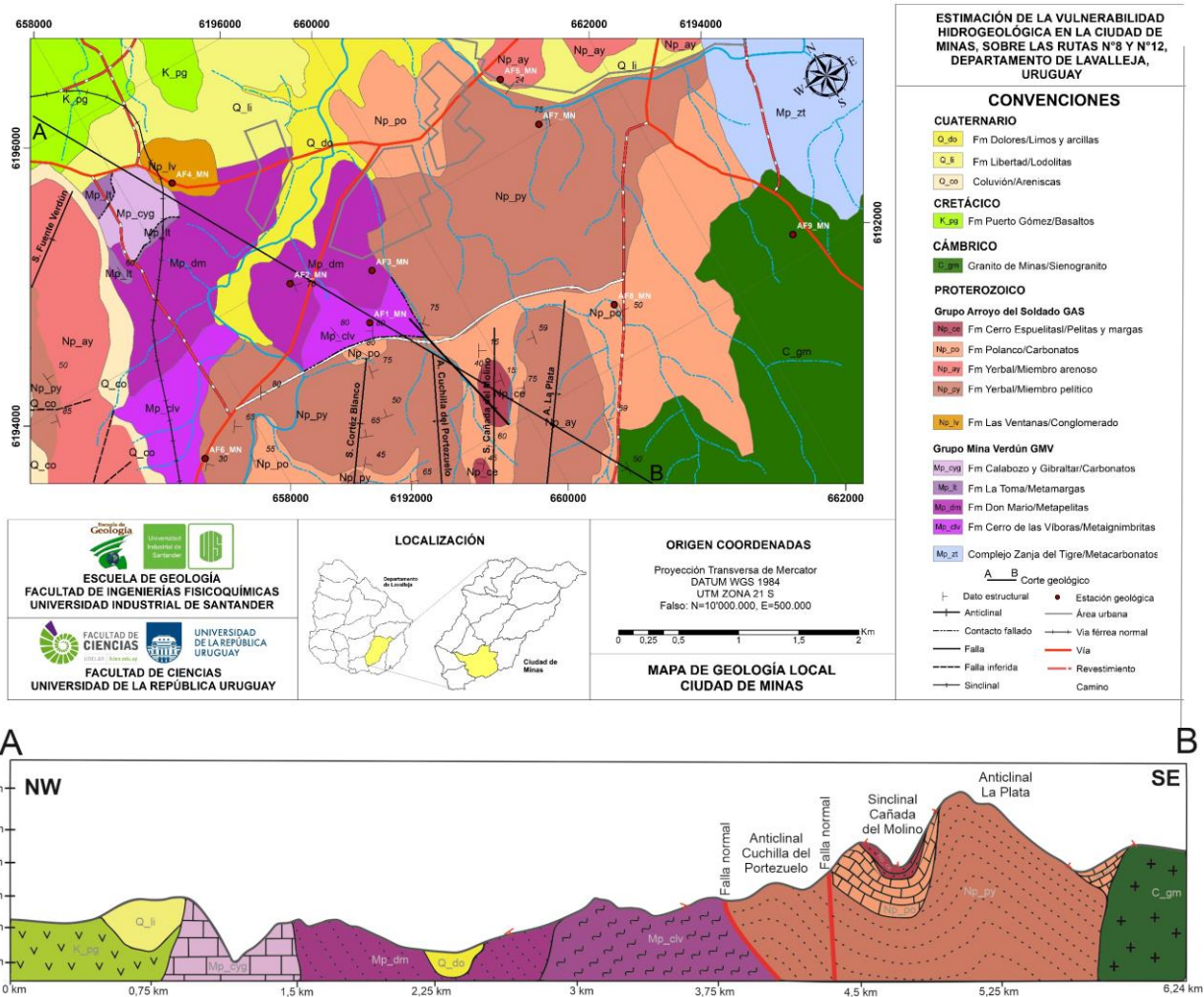
Para lograr este fin, se consultó las planchas topográficas y trabajos de cartografía geológica realizados en la zona, como el efectuado por Gaucher et al., (2004) y resultados de cartografía hidrogeológica, como los plasmados en González (2016).

Igualmente, se efectuó la recopilación de bibliografía referente a los modelos de vulnerabilidad hidrogeológica trabajados por distintos autores; de esta manera se generó un precedente del enfoque propuesto por cada metodología y sus capas temáticas a trabajar, con el objetivo de evaluar la viabilidad de cada modelo para su ejecución antes de iniciar con las jornadas de campo.

Fase 2: En esta segunda etapa se ejecutaron las jornadas de campo en la ciudad de Minas y alrededores, por un periodo de 8 días, en los cuáles se consolidó el registro de las litologías aflorantes, delimitándose zonas de contacto y otras características estructurales de las unidades geológicas en cuestión. Con apoyo del trabajo cartográfico realizado por Álvarez (2020) en una porción del área a escala 1:20.000, la carta geológica del departamento de Lavalleja a escala 1:100.000 consolidada por Spoturno et al., (2019), los puntos de observación y afloramientos consignados en el capítulo de geología local, y la fotointerpretación realizada por medio de los pares de tomas aéreas 171-186, 171-187 y 171-131 y 171-132 a escala 1:20.000 y 38-178 y 38-179 a escala 1:40.000 suministradas por el Servicio Geográfico Militar del Uruguay SGM, se consolidó el mapa geológico del área de estudio a escala 1:20.000 con su respectivo corte geológico (Ver Figura 29), con el fin de definir los antecedentes para el conocimiento, distribución y delimitación de los acuíferos y la elaboración del mapa hidrogeológico local de la localidad de Minas, principal objetivo de esta investigación.

Figura 29

Mapa geológico a escala 1:20.000 del área de estudio.



Nota. Elaboración propia con base en la cartografía geológica de Álvarez (2020) y Spoturno et al., (2019).

Bajo estas premisas, se identificaron 15 formaciones en el área, resultados que corroboran el grado de complejidad geológica con litologías que datan desde el Mesoproterozoico hasta el Cuaternario. A favor del entendimiento de esta secuencia cronoestratigráfica se generó una columna generalizada del área (Ver Figura 30), que expone esquemáticamente la naturaleza

geológica de las rocas aflorantes, su edad, espesores, así como los índices de color reportados en la literatura.

Figura 30

Columna estratigráfica generalizada de las litologías aflorantes en Minas, Uruguay.

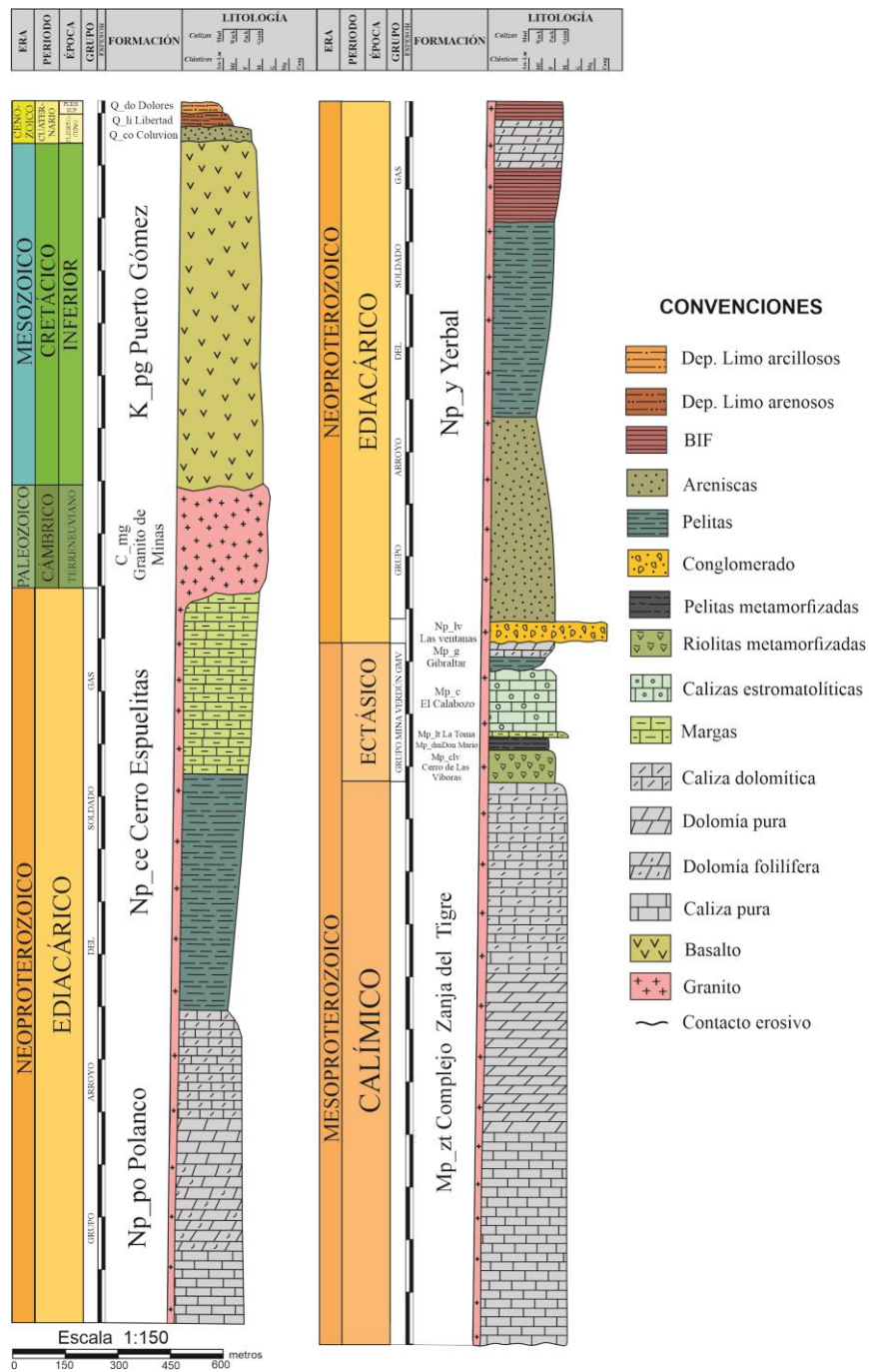
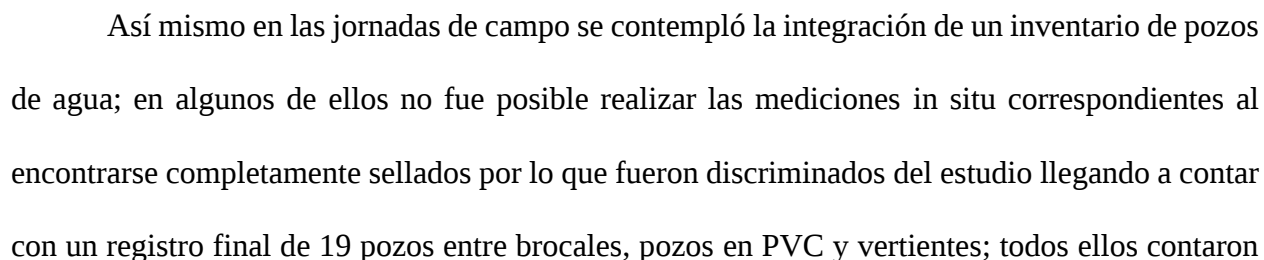


Figura 31

Bloquediagrama geológico del área de estudio.



con la medición de niveles estáticos y parámetros fisicoquímicos in situ (temperatura, PH, STD y conductividad eléctrica), gracias al manejo de una sonda piezométrica y del medidor multiparámetro HI 9829 marca HANNA. Igualmente, los propietarios de los predios visitados suministraron información adicional que apoyaba la consolidación del inventario, como el dato aproximado de caudal diario obtenido con el pozo, profundidad de construcción, uso (consumo humano, riego, ganadería, etc), problemas existentes de alteración de la calidad del líquido; así mismo se realizó la revisión del estado del pozo, su sellado para la prevención de contaminantes externos, usos del suelo y/o usos de algún pesticida o actividad potencialmente contaminante cercana al sistema, etc.

Figura 32

Jornadas de revisión e inventario de pozos (A, B, C) pozos con brocal, (D, E, F) pozos recubiertos con tubería PVC.



Luego del registro completo de este inventario de pozos, se conduce a la recolección de ocho muestras de agua en puntos considerados estratégicos por su incidencia en la investigación (Predios en donde existe un fuerte uso de pesticidas y/o agroquímicos, zonas urbanizadas, cursos de agua superficiales, etc) para su posterior análisis químico de iones mayoritarios. El muestreo de agua se realizó teniendo en cuenta todas las especificaciones de manipulación suministradas por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay LATU, recolectadas y refrigeradas en el transcurso de un (1) día, en temporada seca (Mes de septiembre), a finales de la época de invierno en el país, con una temperatura promedio de 13°C (Ver Figura 33). Al momento de la recolección de agua en los 8 pozos se midieron nuevos criterios: Potencial redox, resistividad eléctrica y turbidez.

Figura 33

Proceso de recolección del muestreo hidroquímico (A, B) Uso de muestreador en un curso de agua superficial (C) Recipientes de plástico para el almacenamiento de las muestras previamente sanitizados con agua destilada y marcados con el indicativo del pozo.

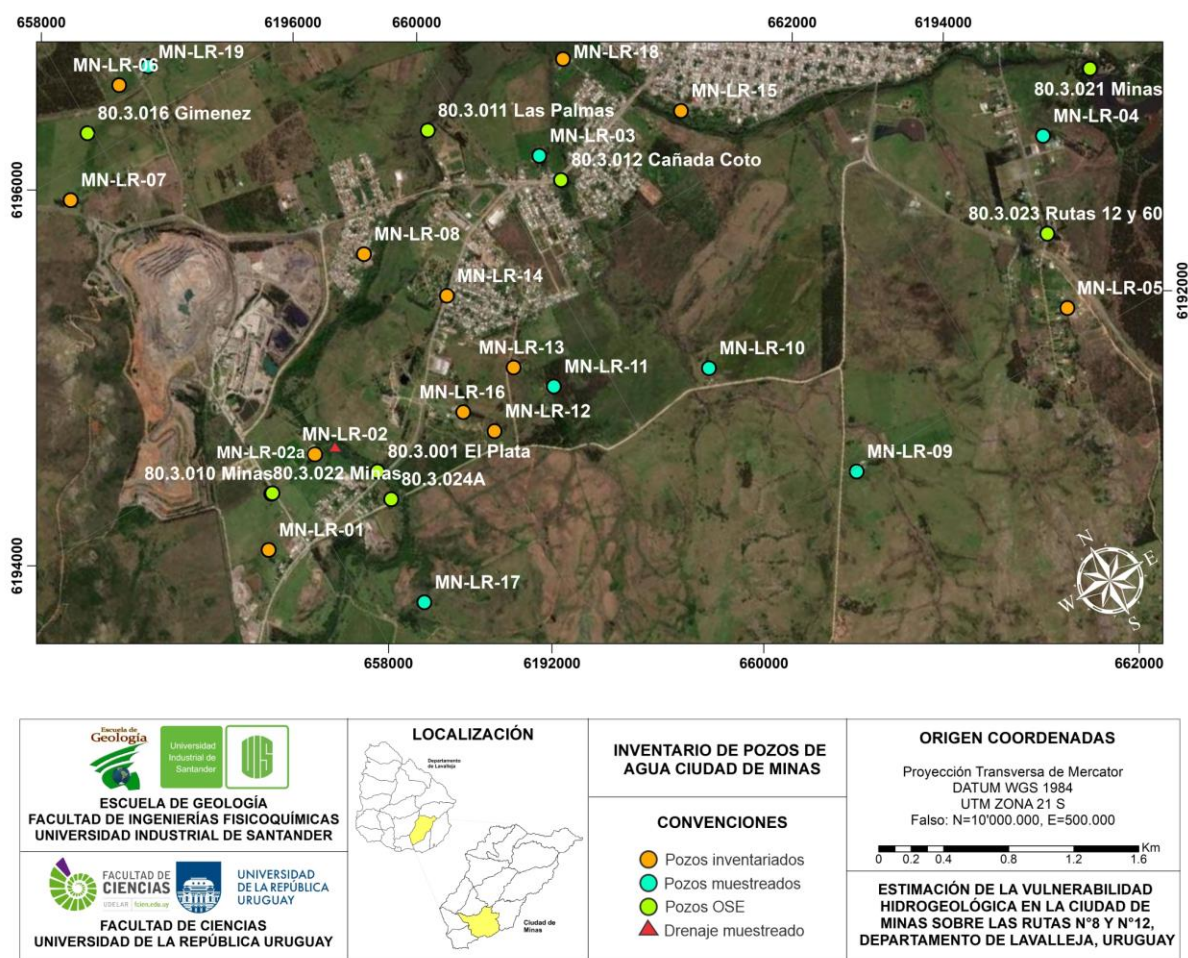


A manera de apoyo al inventario, se realizó la visita a las instalaciones de Obras Sanitarias del Estado OSE, con el fin de recabar antecedentes sobre las perforaciones construidas en el área. Se logró consolidar la información de 9 pozos realizados por esta Institución, donde se revisaron

los perfiles litológicos en profundidad, caudales obtenidos y otros parámetros hidráulicos que logran favorecer el desarrollo de las capas temáticas del modelo de zonificación y el conocimiento del comportamiento hidrogeológico de la zona. La Figura 34 expone la distribución total del inventario de pozos.

Figura 34

Inventario de pozos.



La Tabla 4 incluye la ubicación, tipo de muestreo y parámetros fisicoquímicos de los pozos relevados, denotados con la simbología MN (Ciudad de Minas), LR (Iniciales de la autora) y la secuencia numérica correspondiente.

Tabla 4*Resumen del inventario de pozos en la ciudad de Minas.*

CÓDIGO POZO	COORDENADAS		MUEST	PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS									
	X	Y		NE (m)	Prof pozo (m)	Q (l/h)	T (°C)	pH	Ce (µs/cm)	STD (ppm)	Re (MΩ/cm)	Turb (FNU)	mVORP
MN-LR-01	657654	6193365	Directa*	Surgente	5,8		14,3	7,1	760	380			
MN-LR-02	658310	6193712	Directa		Arroyo La Plata		13,58	7,9	299	149	0,0033	3,2	197,7
MN-LR-02a	658189	6193736	Directa*	5,7	7,3		17	7,25	601	300			
MN-LR-03	660302	6194631	Directa**	3,27	20		18,8	7,15	834	417	0,0012	0,9	145,3
MN-LR-04	663048	6193188	Directa**	9,44	39	8000	17,6	7,55	1108	554	0,0009	0,7	126,3
MN-LR-05	662652	6192195	Directa**	6,07	60	2000	18,4	7,68	192	93			
MN-LR-06	658282	6196302	Directa**	Surgente	40	4000	14,6	7,67	534	266			
MN-LR-07	657675	6195838	Directa*	2,17	5,4		15,9	7,10	652	328			
MN-LR-08	659065	6194648	Directa*	4,64	9		13,6	7,9	805	398			
MN-LR-09	661027	6191975	Directa**	0,8	30	4000	17,04	7,1	598	298	0,0017	0,1	187,1
MN-LR-10	660557	6192981	Directa*	0,3	5		15,2	6,9	210	105	0,0048	0,8	219,2
MN-LR-11	659672	6193364	Directa*	Surgente		360	14,59	7	523	261	0,0019	1,2	220,6
MN-LR-12	659219	6193306	De tanque**	15,5			19,5	6,7	73	36			
MN-LR-13	659516	6193586	De tanque**	3,08	40		11,9	6,8	41	24			
MN-LR-14	659377	6194172	Directa*	0,46	12	3360	16,6	7,73	876	438			
MN-LR-15	661200	6194436	Directa*	1,36			18	7,8	416	207			
MN-LR-16	659113	6193501	De tanque**	26	55	2000		6,7	239	119			
MN-LR-17	658321	6192613	Directa*	Surgente			17,7	7,19	474	237	0,0021	0,7	212,5
MN-LR-18	660726	6195077	Directa*	2,91	4,3		16,2	7,3	480	240			
MN-LR-19	658494	6196313	Directa**	0,56	15		16,7	7,1	773	368	0,0014	0,1	182,5

Nota. MUEST: Tipo de muestra recolectada, NE: Nivel estático, Q: Caudales de extracción en litros/hora, Ce: Conductividad eléctrica, STD: Sólidos totales disueltos, Re: Resistividad eléctrica, Turb: Turbidez, mVORP: Potencial Redox medido en milivoltios, *Pozo brocal, **Pozo en tubería PVC.

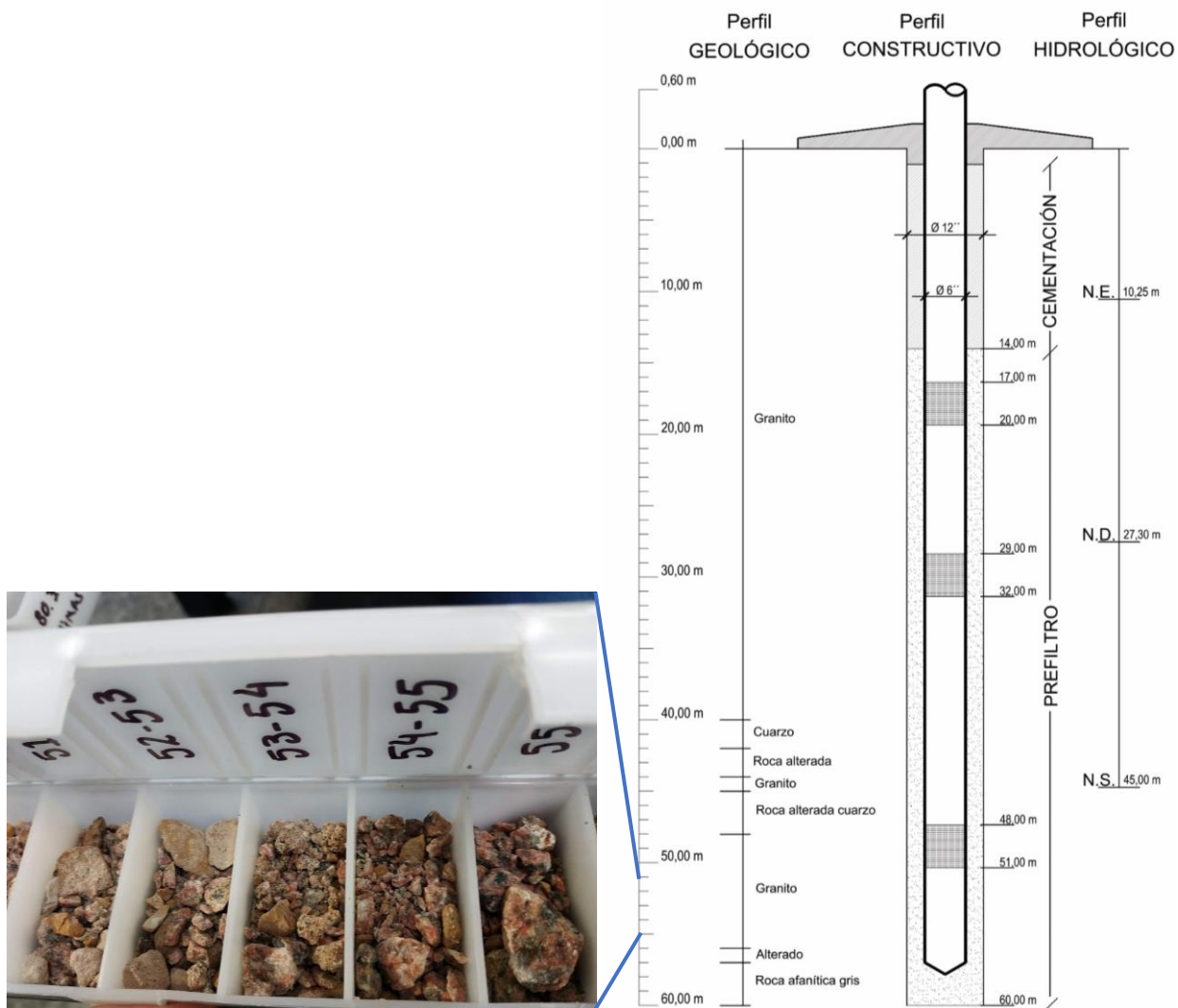
El pozo MN-LR-02a fue relevado y se tomaron los parámetros que se indican en el inventario. Este terreno es parcialmente atravesado por el arroyo La Plata, un importante drenaje en el área, el cuál según versión de los propietarios del predio ha presentado una alteración en su calidad y potabilidad por la operación minera cercana que está contaminando el afluente. Para corroborar dichas anomalías, se obtuvo una muestra de agua del arroyo, denotada con la nomenclatura MN-LR-02 (Ver Figura 33), se tomaron los parámetros fisicoquímicos in situ, y se realizó el análisis de iones mayoritarios.

Fase 3: Luego de la organización de los datos recolectados en las jornadas de campo, se accedió a información preexistente en el área que apoyara la creación de las capas temáticas por medio del software ArcGIS 10.5. Así pues, se obtuvo información del Instituto Uruguayo de Meteorología INUMET y la base de datos mundial *Climatic Research Unit* (CRU) de la Universidad de Anglia del Este, permitiendo el análisis de precipitaciones y temperatura que se muestra en el apartado de climatología y que constituye la base para la estimación de la recarga potencial de los acuíferos, variable contemplada en el modelo de zonificación SINTACS. Como se mencionó anteriormente, también fue posible la visita a Obras Sanitarias del Estado OSE; en dicha jornada se obtuvo de manera digital información sobre la distribución de los pozos construidos por la Institución, año de creación, perfiles geológicos, hidrológicos y constructivos, ensayos de bombeos con la definición de los parámetros hidráulicos del pozo, entre otras consideraciones. Además, se logró la revisión de algunos testigos recuperados de las perforaciones más recientes, con el fin de estimar con mayor claridad la naturaleza de las litologías y como herramienta para la consolidación de la información de la zona saturada y no saturada de los acuíferos presentes en la región. Un ejemplo de los testigos verificados, pertenecientes a la

perforación 80.3.023 Rutas 12 y 60, es mostrado en la Figura 35. Dichas muestras corresponden a la roca ígnea clasificada como un Sienogranito, perteneciente a la unidad Granito de Minas, quién presenta una homogeneidad en profundidad pues el registro hasta los 60 metros se compone del mismo tipo de roca alterada y fracturada, con ligeros cambios composicionales.

Figura 35

Testigos de Sienogranito recuperados hasta los 60 metros de la perforación 80.3.023 Rutas 12 y 60, perteneciente a OSE.



La tabla 5 expone la ubicación de las perforaciones de OSE en el área de estudio distinguidas en la figura 34 y la litología a la que se encuentran asociadas.

Tabla 5

Perforaciones de OSE en la localidad de Minas.

CÓDIGO POZO OSE	COORDENADAS		LITOLOGÍA
	X	Y	
80.3.001 El Plata	658471	6193449	Pelitas Fm Yermal
80.3.010 Minas	657837	6193658	Metaignimbritas Fm Cerro de Las Víboras
80.3.011 Las Palmas	659784	6195112	Carbonatos Fm Polanco
80.3.012 Cañada Coto	660344	6194438	Carbonatos Fm Polanco
80.3.016 Gimenez	657965	6196139	Basaltos Fm Puerto Gómez
80.3.021 Minas	663504	6193404	Carbonatos Complejo Zanja del Tigre
80.3.022 Minas	657843	6193658	Metaignimbritas Fm Cerro de Las Víboras
80.3.023 Rutas 12 y 60	662768	6192660	Sienogranito Granito de Minas
80.3.024A	658457	6193263	Pelitas Fm Yermal

Por otra parte, se realizó la consulta a la página oficial del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca del Uruguay MGAP con el fin de obtener información edafológica que apoyara la creación de la capa T del método SINTACS “Efecto de mitigación de los suelos” y que será explicada con mayor detalle en el numeral 6.1.2 de este informe.

De la misma manera, se efectuó la búsqueda de un Modelo Digital de Elevación (DEM) en el servidor ASF Data Search Vertex de la Universidad de Alaska Fairbanks como herramienta para la consolidación de la capa S del método SINTACS “Pendientes”. La metodología empleada para la creación de este mapa es detallada en el numeral 6.1.3.

Finalmente, en esta etapa se obtuvieron los resultados de la composición de iones mayoritarios de las muestras enviadas a analizar; y se dio inicio a la organización y esquematización en los diagramas de clasificación de aguas para su posterior interpretación.

Fase 4: Luego de la construcción de las capas temáticas con ayuda del software ArcGIS versión 10.5, esta misma interfaz permitió la ponderación y el álgebra de mapas por medio de la secuencia: ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Map Algebra → Raster Calculator. De esta manera, se logró consolidar los resultados de zonificación de acuerdo con los criterios previamente definidos para cada uno de los modelos. Así mismo, en esta etapa se llevó a cabo la interpretación y evaluación de los rangos fisicoquímicos medidos en los pozos y se dio inicio a la discusión de los resultados.

Fase 5: Finalmente, la última etapa de la investigación consistió en la organización de los resultados en el presente documento, complementando el contexto geológico e hidrogeológico del área, el marco teórico sobre las metodologías en estudio y consolidando capítulos adicionales enfocados en la resolución de los objetivos, discusión, conclusiones de la investigación y recomendaciones para proyectos futuros en la región.

6.1 Desarrollo del modelo SINTACS

A continuación se expone una descripción detallada sobre los métodos empleados para el desarrollo de las capas temáticas del modelo SINTACS a escala 1:20.000, su reclasificación correspondiente de acuerdo con las tablas de ponderación respectivas y su conversión a formato ráster para la aplicación de la ecuación que permitió la obtención del mapa índice de vulnerabilidad intrínseca en el área.

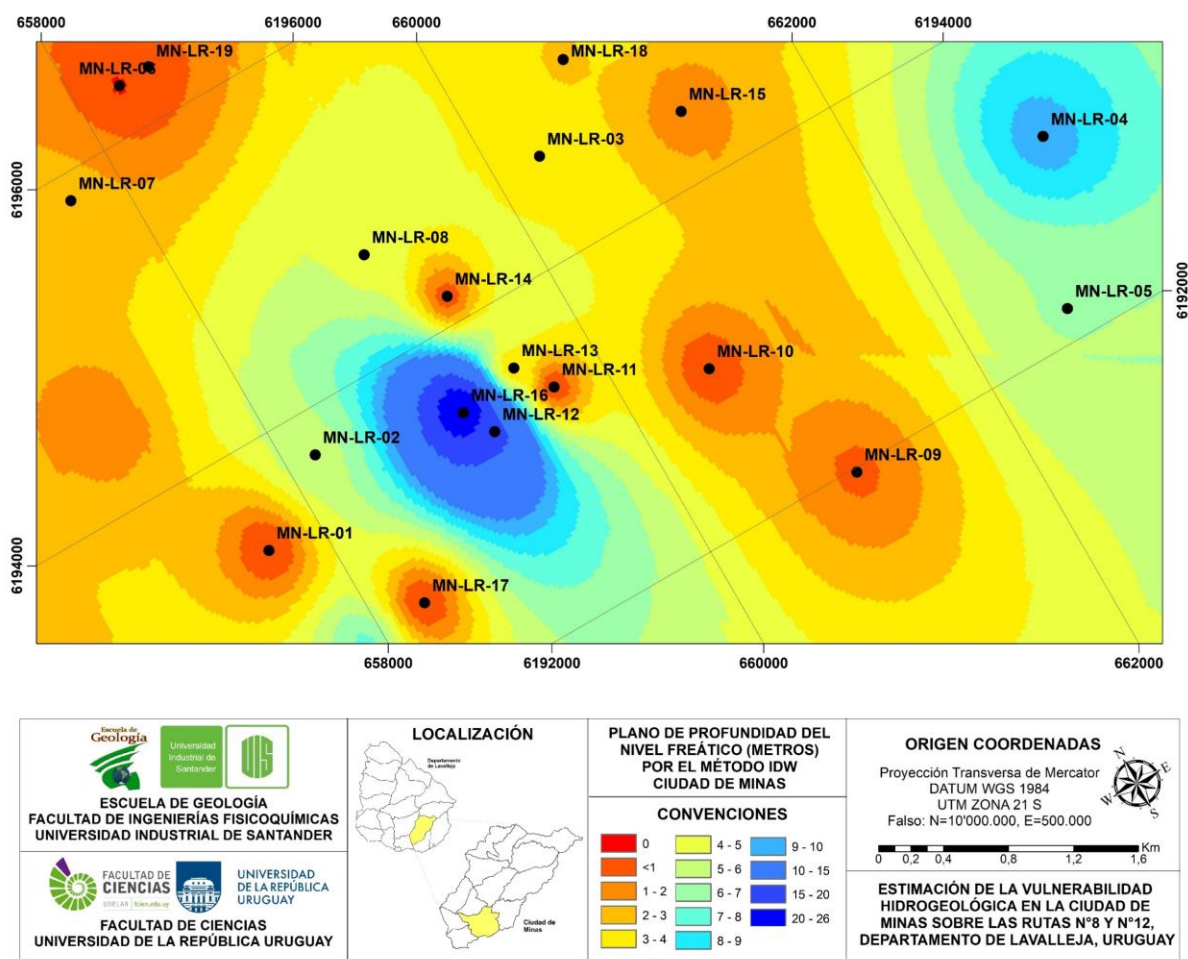
6.1.1 Parámetro S- Profundidad del nivel freático

Para la consolidación de esta capa temática, inicialmente se crea en el software un shapefile tipo punto con los valores de niveles estáticos obtenidos en las jornadas de campo para cada uno de los pozos relevados. Luego de ello, y teniendo el shapefile tipo polígono de la zona de estudio,

se toma la ruta ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Interpolation → IDW y se ajusta las entradas y salidas del método de interpolación. El resultado es mostrado en la Figura 36.

Figura 36

Plano de profundidad del nivel freático en la localidad de Minas por el método de interpolación IDW.



Para la consolidación de esta capa temática se realizó la prueba en el SIG con métodos de interpolación adicionales como Kriging y Nearest-neighbor, siendo el resultado obtenido por el

método IDW el que genera mayor confiabilidad en la distribución de los niveles estáticos de los diferentes acuíferos presentes en el área.

6.1.2 Parámetro T- Efecto de mitigación de los suelos

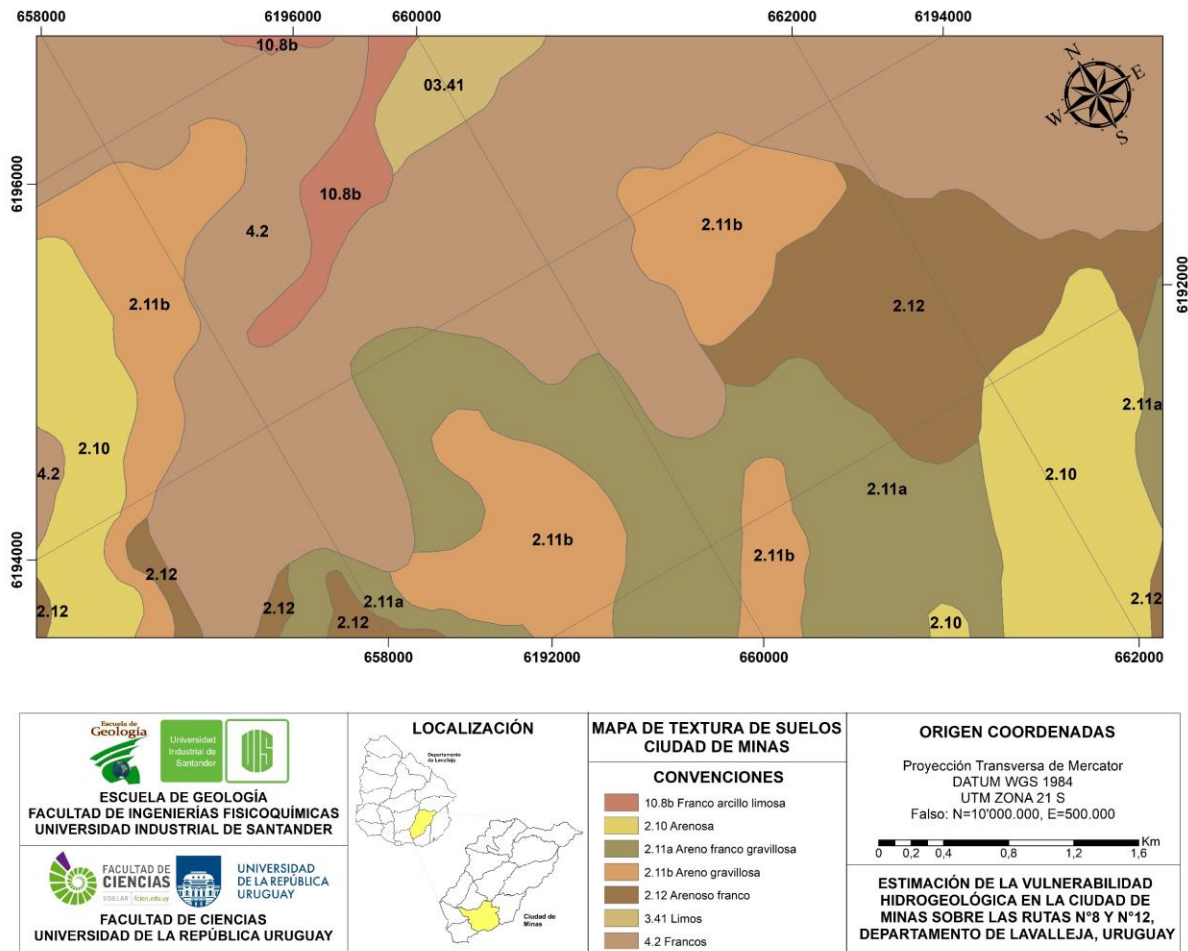
Un estudio edafológico detallado involucra muestreos, calicatas, análisis granulométricos, etc; actividades que no fueron contempladas en el plan de las jornadas de campo de esta investigación. Por esta razón, el mapa que define la textura de los suelos en el área se consolidó con información preexistente, por una parte, de los perfiles de pozos de OSE y principalmente, gracias a la información consultada en el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca del Uruguay MGAP, quién expone la cartografía de suelos de la Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra CONEAT, creada con el fin de medir la capacidad productiva del país en términos de carne bovina, ovina y lana en pie (Art. 65 de la Ley 13695), y la cual agrupa a los tipos de suelos dominantes según la clasificación de Suelos del Uruguay del MGAP de 1996.

La cartografía de grupos de suelo CONEAT se consolidó por medio de jornadas de campo, análisis fisicoquímicos y fotointerpretación a escala 1:40.000, lo que permitió la evaluación y descripción de los suelos, su carácter textural, rasgos geológicos y formas relieve predominantes (MGAP, 2020). La cartografía CONEAT se presenta a escala 1:20.000 y se superpone al catastro rural de todo el territorio Uruguayo.

A partir del formato Shapefile de suelos CONEAT suministrado por el MGAP, se realizó la delimitación del área, encontrando así la existencia de 7 tipos texturales (Figura 37), donde sobresale la distribución de los suelos con textura Franco y Arenoso franco graviloso. Esta capa es fundamental para la estimación de la infiltración básica, variable contemplada en el cálculo de la recarga potencial del sistema (Parámetro I en SINTACS).

Figura 37

Mapa de textura de suelos de la localidad de Minas.



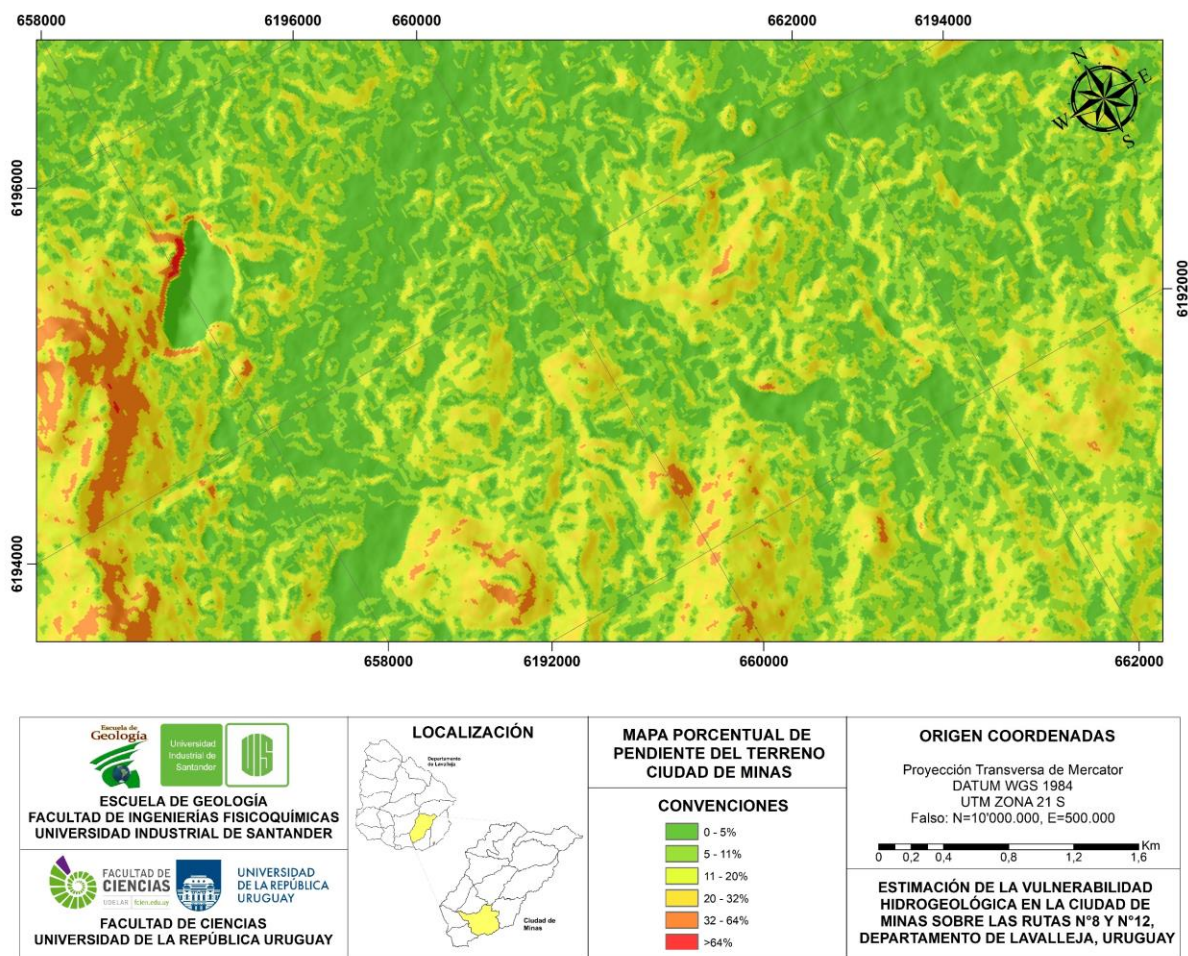
6.1.3 Parámetro S- Pendientes

Como se indicó anteriormente, la herramienta empleada para la creación del mapa de pendientes del área fue, inicialmente, la base de datos ASF Data Search Vertex de la Universidad de Alaska Fairbanks, quién permitió la descarga de un modelo digital de elevación (DEM) del satélite ALOS PALSAR con resolución 12.5 metros. Posteriormente, esta capa ráster es recortada a la zona de estudio y procesada en ArcGIS 10.5 siguiendo la ruta: ArcToolbox → Spatial Analyst

Tools → Surface → Slope. El dato de entrada corresponde al modelo digital de elevación y el dato de salida puede expresarse en grados o porcentaje. Para este caso, se generó el mapa porcentual de pendientes que se expone en la Figura 38. Se logra evidenciar que en la zona domina un relieve suave con pendientes menores a 11%. El ligero aumento de la pendiente se focaliza en las prominencias topográficas anteriormente catalogadas en el numeral 2.3 *Relieve*, principalmente hacia el W del área sobre el Cerro de los Chivos y el Cerro Verdún.

Figura 38

Mapa porcentual de pendiente del terreno de la localidad de Minas.



La recarga potencial de los acuíferos presentes en la ciudad de Minas es estimada por medio de la construcción de un balance hidrológico de suelos a largo plazo; esto debido a la escasez de datos preexistentes para la integración de un análisis a corto plazo. Por ello se trabajó en la definición y consolidación de los valores de precipitación media anual en mm/año para las diferentes estaciones involucradas, el índice de temperatura media anual en °C, el cálculo de la evapotranspiración real en mm/año, y el cálculo de la infiltración en mm/año.

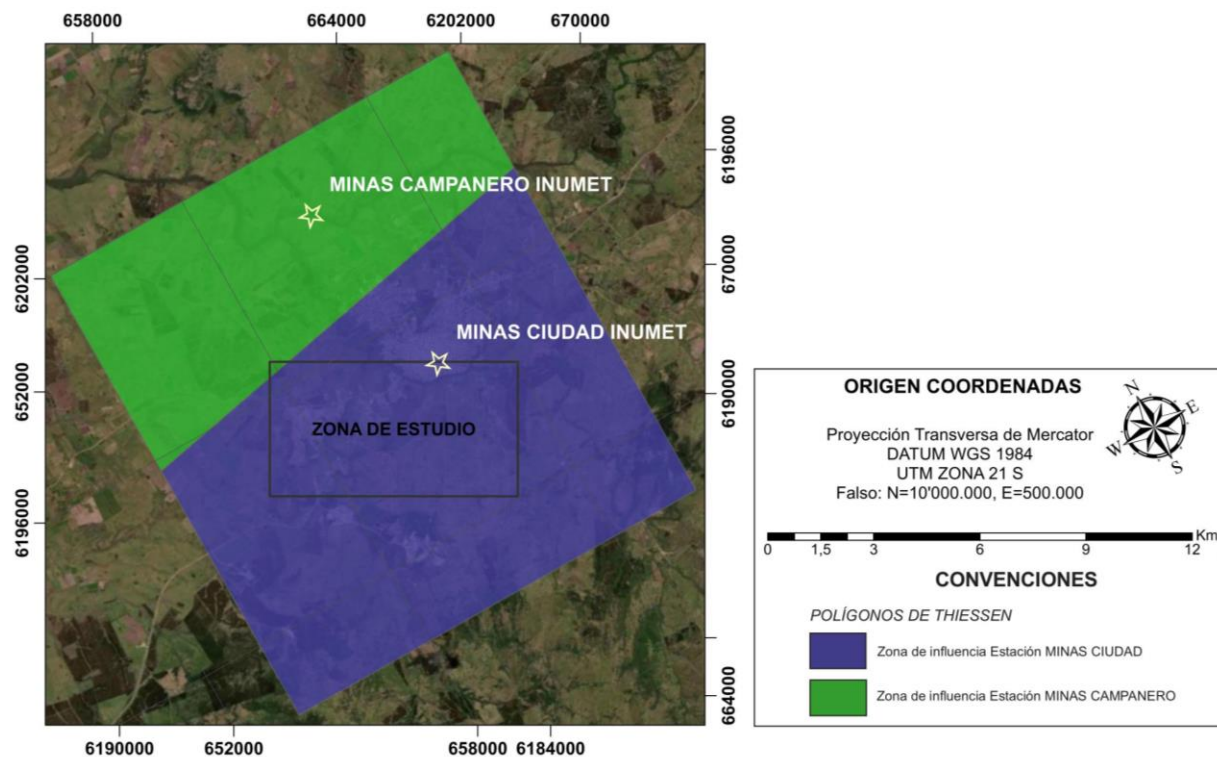
El departamento de Lavalleja cuenta con precipitaciones significativas repartidas durante todo el año, y se caracteriza por presentar un clima subtropical húmedo (Cfa según la clasificación climática de Köppen-Geiger), con veranos cálidos y húmedos e inviernos frescos (Climate-data.org, 2014).

Mediante polígonos de Thiessen como método de interpolación para efectuar el análisis climatológico, se establece el área de influencia de las estaciones pluviométricas del Instituto Uruguayo de Meteorología INUMET en la ciudad de Minas y cercanías, los cuales suministran valores de precipitación diaria durante un periodo comprendido entre 1981 y 2018 (37 años). Como se indica en la Figura 39, la estación *MINAS CIUDAD* abarca casi la totalidad del sector en estudio, con un área de 26.48 Km², con respecto a la estación *MINAS CAMPANERO*, que abarca una pequeña porción de 0.12 Km². Con un total de 456 datos de precipitación diaria necesarios en cada una de las estaciones para la estimación del promedio multianual, *MINAS CIUDAD* presenta 78 datos faltantes (17%) y *MINAS CAMPANERO* 54 datos faltantes (11,8%). La ventaja encontrada en estas series reside en que la ausencia de información no ocurre en las mismas fechas entre una y otra, por lo que es posible utilizar un método estadístico de correlación para completar las secuencias de ambas estaciones. Por tanto, se realiza una revisión del caso de estudio propuesto en Herrera Oliva et al., (2017) donde se plantea un análisis de regresión lineal entre estaciones

climatológicas cercanas con el fin de completar el registro de precipitación obteniendo una ecuación lineal e interpretando la proporción de ajuste que se ha alcanzado con el modelo a través de la estimación del coeficiente de determinación R^2 . Con base en esta metodología, se procede a completar las series de precipitación en las estaciones de interés para lograr los respectivos análisis anuales y mensuales mostrados a continuación.

Figura 39

Polígonos de Thiessen-Estaciones de referencia.



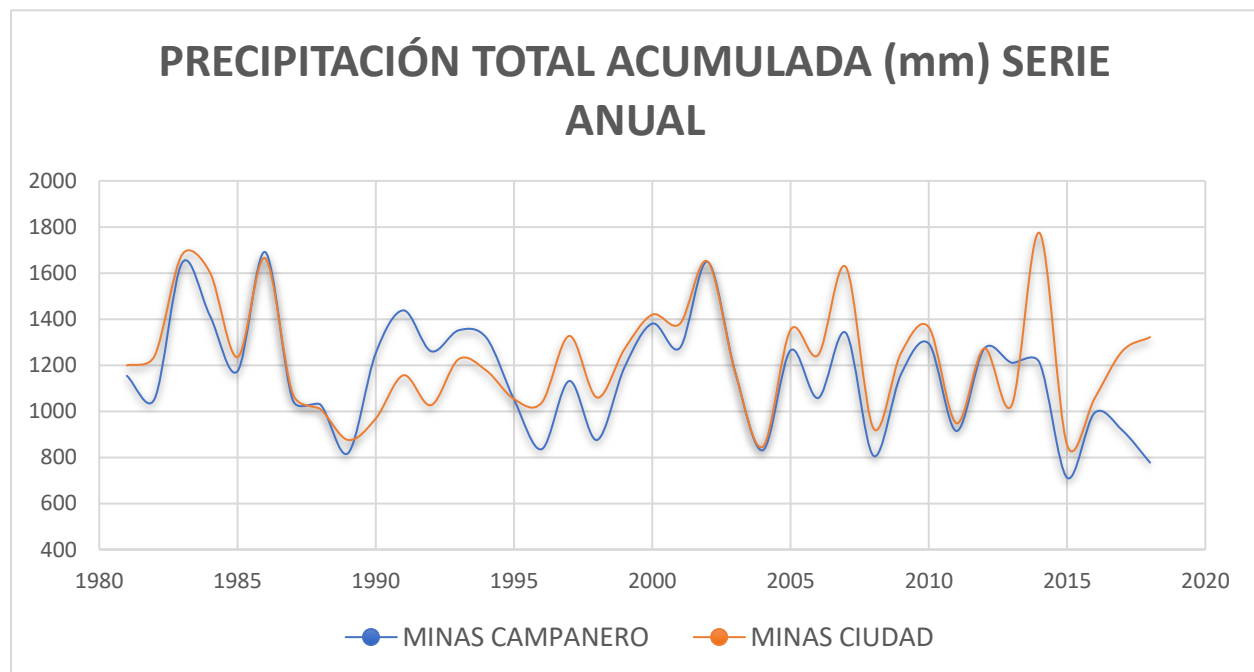
A partir de las series históricas de la Estación *MINAS CIUDAD*, ubicada en las coordenadas geográficas $34^{\circ}22'40.33''$ S y $55^{\circ}14'14.67''$ W, se evalúa el comportamiento de las precipitaciones totales acumuladas con respecto a la serie anual. En promedio, la precipitación anual es de 1227,13

mm, resaltando la magnitud de la precipitación reportada en el año 2014, el mayor valor registrado en la serie, con 1774,4 mm.

Así mismo, partiendo de las series históricas de la Estación *MINAS CAMPANERO*, ubicada en las coordenadas geográficas 34°19'45.89" S y 55°15'00.29" W, se evalúa el comportamiento de las precipitaciones totales acumuladas con respecto a la serie anual. En promedio, la precipitación anual es de 1157,18 mm, resaltando la magnitud de las precipitaciones reportadas en los años 1986 y 2002, los mayores valores registrados en la serie, con 1691 mm y 1648,52 mm respectivamente.

Figura 40

Precipitación total acumulada, serie anual estaciones Minas Ciudad y Minas Campanero.

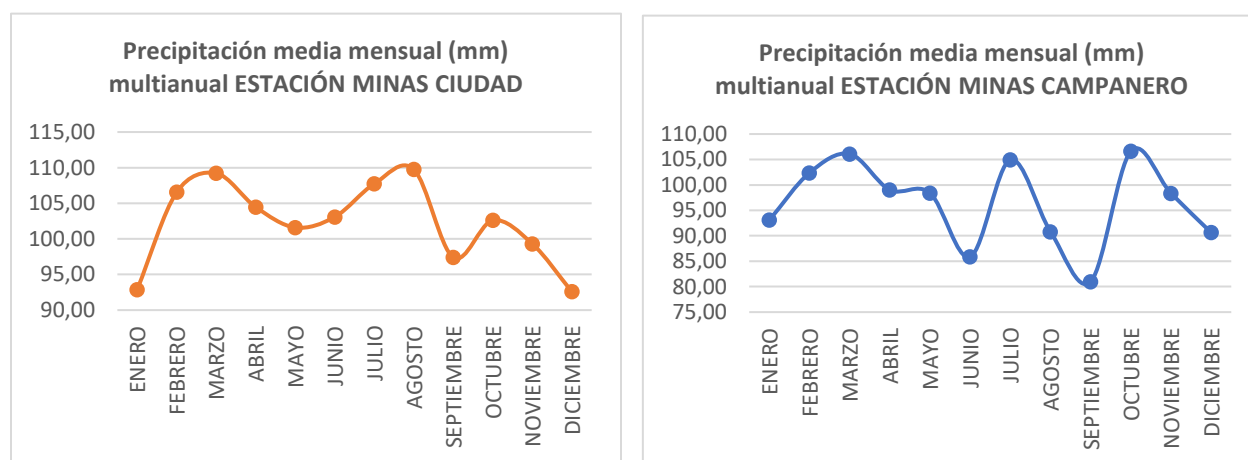


Las precipitaciones medias mensuales multianuales del registro histórico para ambas estaciones se presentan en la Figura 41. Para la estación *MINAS CIUDAD*, se tiene un valor

promedio de 102,26 mm/mes, con precipitaciones máximas en los meses de Marzo y Agosto y con precipitaciones mínimas en Diciembre y Enero, concordante con la época de verano en el país. Para la estación *MINAS CAMPANERO*, cuenta con un valor promedio de 96,243 mm/mes, con precipitaciones máximas en los meses de Marzo y Octubre y con precipitaciones mínimas en Septiembre y Diciembre.

Figura 41

Precipitación media mensual (mm) multianual de la Estación Minas Ciudad y Estación Minas Campanero.



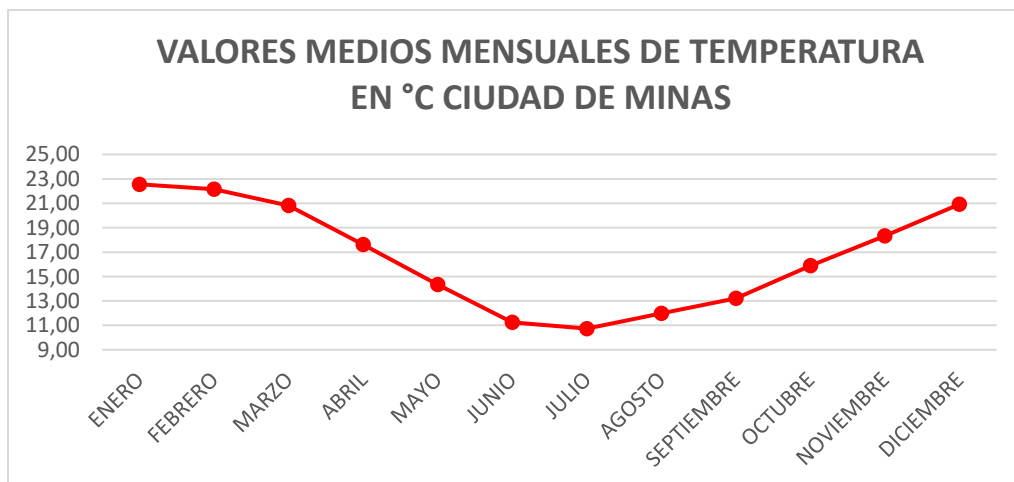
Por otra parte, los antecedentes de temperatura de la zona de estudio fueron adquiridos a través de la base de datos mundial *Climatic Research Unit* (CRU) de la Universidad de Anglia del Este, Inglaterra, de acceso libre, quién cuenta con un registro de temperatura media mensual por más de 100 años, datos separados por medio de cuadrículas de 50 km x 50 km en Google Earth. Esta información fue comparada con los datos de temperatura media mensual obtenidos de una estación climatológica privada cercana al área, perteneciente a la compañía SALUS S.A, que cuenta con un registro desde el año 2013 al año 2018; esto con el objetivo de contrastar ambos

conjuntos de datos en este corto periodo de tiempo encontrando así que la información de la base de datos mundial es coherente con las condiciones reales de la zona, convirtiéndose en una herramienta confiable en el cálculo del balance hidrológico a largo plazo pues logra abarcar el mismo periodo de 37 años en los que se tiene documentada la precipitación.

La distribución media mensual multianual de la temperatura en Minas se presenta en la Figura 42. Los meses más fríos del año son Junio, Julio y Agosto, correspondientes a la época de invierno en el país, siendo Julio el mes con las temperaturas más bajas reportadas, con una media mensual de 10.73 °C. En contraste, los meses de Diciembre, Enero y Febrero son los más cálidos, Enero reportando las temperaturas más altas, con una media mensual de 22.56°C. El valor medio anual de la temperatura en la ciudad es de 16.65 °C.

Figura 42

Valores medios mensuales de temperatura en °C para la ciudad de Minas por el periodo comprendido entre 1981 y 2018.



La evapotranspiración real en mm/año es calculada a partir de las estimaciones realizadas con la serie de datos de temperatura y precipitación expuesta anteriormente. La evapotranspiración

real se define como la pérdida por evapotranspiración en condiciones reales, dependiendo de las disponibilidades de agua, siendo una variable fundamental en el cálculo del balance hídrico de la cuenca (Barreto y Morales, 2017).

Con el dato medio anual de temperatura (16.65°) y el par de datos de precipitación media total multianual obtenidos para la estación Minas Ciudad y la estación Minas Campanero (1227,13 mm y 1157,18 mm respectivamente) se realizó el cálculo de la evapotranspiración real a través de la ecuación de TURC, así:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad (3)$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (4)$$

Donde ETR es evapotranspiración real (mm/año), T es temperatura promedio anual en °C y P es precipitación media en mm/año.

De esta manera, se logró definir una pérdida por evapotranspiración real de 764,12 mm/año en la estación MINAS CIUDAD, y un valor de 748,04 mm/año para la estación MINAS CAMPANERO. Dicha estimación es involucrada en la ecuación final cuando se conozca el valor de Infiltración obtenido por el método de Schosinsky y Losilla (2000).

En este orden de ideas, Schosinsky y Losilla (2000) proponen un modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Se denomina infiltración a la porción de

agua disponible en mm/mes que resulta de la diferencia entre la precipitación mensual en una cuenca y la escorrentía producida, definiéndose a partir de la siguiente expresión:

$$I = 0,88 * C * P \quad (5)$$

$$C = (Kp + Kv + Kfc) \quad \text{Para } Kp + Kv + Kfc < 1$$

$$C = 1 \quad \text{Para } Kp + Kv + Kfc > 1$$

$$C = 0 \quad \text{Para } P < 5 \text{ mm/mes}$$

Donde I es la infiltración mensual (mm/mes), P la precipitación mensual (mm/mes), C es el coeficiente de infiltración, Kfc corresponde a la fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo, Kp la fracción que infiltra por efecto de la pendiente y Kv la fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal. Así mismo, la constante 0,88 indica la fracción interceptada por el follaje.

Para el cálculo de los coeficientes Kp y Kv, Schosinsky y Losilla (2000) propone unos valores teóricos; dichos valores fueron revisados y asignados según las condiciones del área de estudio (Ver Tabla 6). El mapa raster de pendientes (Parámetro S en SINTACS) fue reclasificado bajo estas condiciones y además, se desarrolló un mapa de cobertura de suelos del área a escala 1:20.000 tomando como referencia la nomenclatura de clasificación propuesta por el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial de Uruguay (Figura 43). Con esta zonificación de coberturas, se logró asignar los coeficientes Kv propuestos en esta metodología para cada uno de los polígonos y rasterizar la capa a través de la ruta ArcToolbox → Conversion Tools → To Raster.

Tabla 6

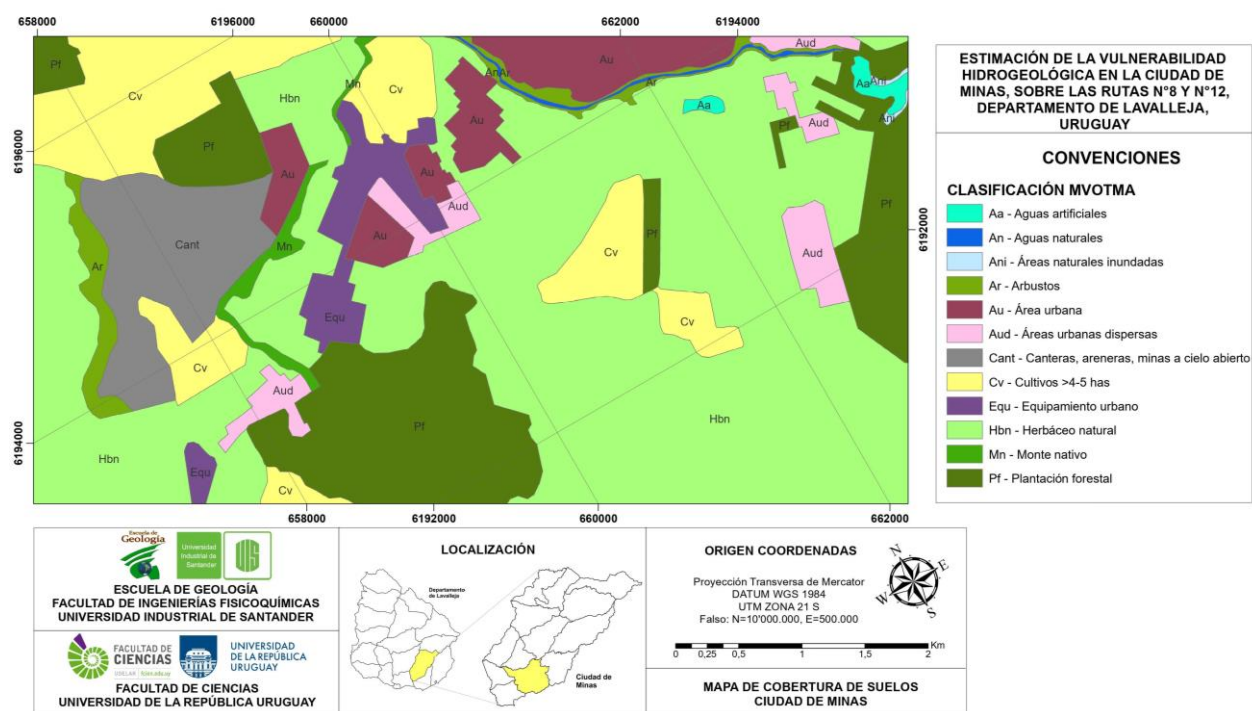
Coeficientes K_p y K_v .

Pendiente	Rango	K_p	Cobertura vegetal	K_v
Muy plana	0,02%-0,06%	0,3	Cobertura con zacate menos 50%	0,09
Plana	0,3%-0,4%	0,2	Terrenos cultivados	0,1
Algo plana	1-2%	0,15	Coberturas con pastizal	0,18
Promedio	2%-7%	0,1	Bosques	0,2
Fuerte	Mayor de 7%	0,06	Cobertura con zacate más de 75%	0,21

Nota. Tomado y adaptado de Schosinsky y Losilla (2000).

Figura 43

Mapa de cobertura de suelos de la localidad de Minas.



De carácter general, se puede observar que la cobertura dominante corresponde a herbáceo natural, así mismo las plantaciones forestales integran una porción importante en la zona. Con base

en la clasificación de Schosinsky y Losilla (2000) expuesta en la Tabla 6, el monte nativo y las plantaciones forestales son reclasificadas como bosques, los arbustos son clasificados como coberturas con pastizal, el herbáceo natural se relaciona con coberturas con zacate de más del 75% y las áreas urbanas dispersas y el equipamiento urbano se reclasifican como coberturas con zacate menos del 50%. Cabe aclarar que, aunque se esté evaluando un área parcialmente urbanizada, gran parte de estos asentamientos se encuentran sobre terrenos no pavimentados. Solo en el casco urbano de la ciudad de Minas, y en la cantera activa de Verdún, se podría establecer condiciones de impermeabilidad dominantes que favorecerían la esorrentía por lo que fueron asignados coeficientes K_v menores a 0,09. Así mismo, la pendiente juega un papel fundamental en el cálculo de la infiltración, pues el relieve plano que domina en la zona disminuye la capacidad de transporte del agua por esorrentía directa, ya que tienden a asentarse y a formar cuerpos de agua temporales, estas características fueron observadas en campo y se muestran en la Figura 44.

Figura 44

Plantaciones forestales y coberturas de pastizales saturadas en agua.



Por otra parte, para calcular el coeficiente K_{fc} , Schosinsky y Losilla (2000) asumen una ecuación que involucra la infiltración básica del suelo f_c medida en campo y la operan con unidades mm/día. Teniendo en cuenta que en este estudio no se contempló dicho análisis edafológico, se toma como referencia valores teóricos de infiltración básica para diferentes texturas, los cuales son mostrados en la Tabla 7.

$$K_{fc} = 0,267 * \ln(f_c) - 0,000154 * f_c - 0,723 \quad (6)$$

Tabla 7

Valores de referencia de velocidad de infiltración básica f_c en mm/h según la textura del suelo.

Textura del suelo	Rango de variación normal (mm/h)	Valor promedio mm/h	Valor promedio mm/d
Arenoso	<30	25	600
Arenoso Franco	15-30	22,5	540
Franco Arenoso	12-18	15	360
Franco	8-14	11	264
Franco Limoso	6-10	8	192
Arcilloso limoso	5-8	5	120
Arcilloso	3-6	3	72

Nota. Tomado y adaptado de Gomez (2019).

Con esta información convertida en unidades mm/día, se calcula la fracción de agua que infiltra por efecto de la textura del suelo K_{fc} (Tabla 8) y en conjunto, con la capa de textura de suelos (Parámetro T en SINTACS) previamente digitalizada, se relacionan y asignan los coeficientes obtenidos. Como último paso, esta capa se convierte a ráster y se realiza una sumatoria de los 3 coeficientes de infiltración por medio del álgebra de mapas siguiendo la ruta ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Map Algebra.

Tabla 8

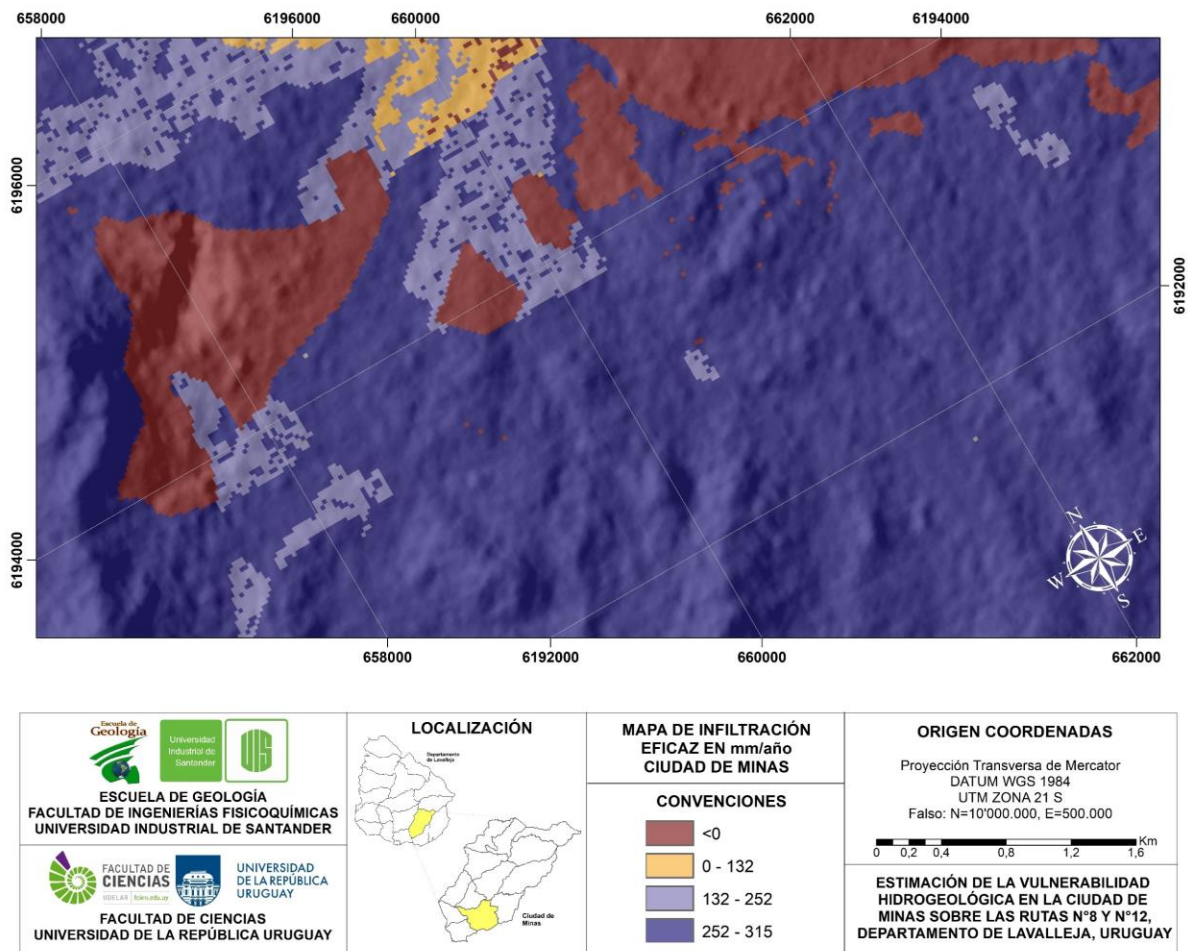
Coeficiente K_{fc} para cada textura de suelo.

Textura del suelo	K_{fc}
Arenoso	0,89
Arenoso Franco	0,87
Franco Arenoso	0,79
Franco	0,72
Franco Limoso	0,65
Arcilloso limoso	0,53
Arcilloso	0,4

Con lo anterior, se obtiene un único mapa de Coeficiente de Infiltración (C) en el que se discrimina todos los valores de $C > 1$ reclasificándolos al valor 1. Finalmente, esta capa se opera por álgebra de mapas con los datos de precipitación media mensual multianual de cada uno de los meses del año, obteniendo así la Infiltración mm/mes para los 12 meses con la ecuación (5). Estos valores nuevamente son agrupados y se obtiene un rango de Infiltración en el área que varía entre 64 y 1079,87 mm/año, asumiéndose así bajos valores de pérdida de agua por escorrentía obtenidos en ciertos polígonos. A partir de este valor, y teniendo el dato de evapotranspiración real en mm/año para cada una de las estaciones pluviométricas del área, se calcula la diferencia entre I y ETR para obtener el valor de I eficaz o recarga potencial del sistema en mm/año y se zonifica la variación como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Mapa de infiltración eficaz en mm/año para la localidad de Minas.



Se asume un alto índice de recarga potencial del sistema en algunos sectores (Superando el 20% del total de precipitación anual). Esto es debido a los valores de referencia obtenidos para el cálculo del coeficiente de infiltración por efecto de la textura del suelo K_{fc} , ya que en la zona dominan las fracciones arenosas, arenas y gravas y ocasionalmente arenas francosas, las cuáles presentan los mayores puntajes de infiltración básica obtenidos de la literatura. Así mismo, las pendientes del terreno contribuyen al aumento en la valoración del K_p . Cabe destacar que como el K_{fc} es un dato obtenido de manera teórica, la confiabilidad del resultado, así como se asume en

Schosinsky y Losilla (2000), sería más aceptable si se contase con jornadas de campo que validaran la información. En este caso, se mantiene este resultado preliminar de zonificación de recarga potencial a través del balance hidrológico a largo plazo, sugiriendo un estudio más detallado de la textura de los suelos que conforman el área y su capacidad de infiltración.

6.1.5 *Parámetro A- Características hidrogeológicas del acuífero, N- Capacidad de atenuación de la zona no saturada, C- Conductividad hidráulica*

A continuación se presenta la revisión de estas tres variables del modelo SINTACS en conjunto, teniendo como referencia la cartografía geológica local definida en la Figura 29.

La Tabla 9 presenta un resumen del carácter hidrogeológico de cada una de las unidades aflorantes en el área. Esta información fue consolidada gracias a la revisión de los trabajos de González (2016) y Álvarez (2020), quienes abordan preliminarmente la complejidad hidrogeológica en los alrededores de Minas. Finalmente, con la colaboración de Collazo (com. pers.) se valida la información aquí definida.

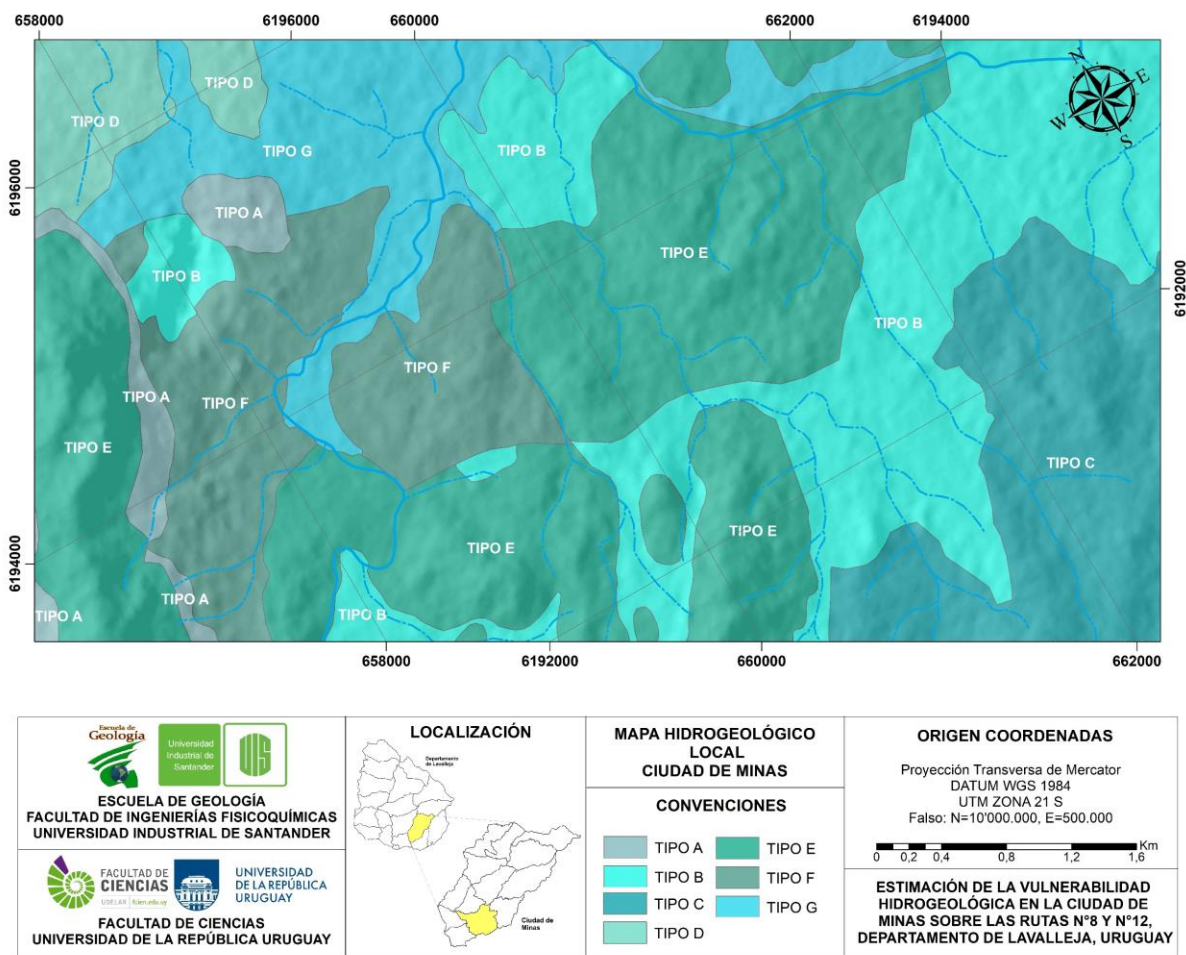
Tabla 9*Carácter hidrogeológico de las unidades aflorantes en la localidad de Minas.*

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	GEOLOGÍA	TIPO DE ACUÍFERO	GRADO DE CONFINAMIENTO	ZONA VADOSA	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/día)
Fm Dolores	Limos y arcillas	Acuicludo	-	Arcillas limosas	<0.04
Fm Libertad	Lodolitas	Acuicludo	-	Limos	<0.04
Coluvión	Areniscas	Poroso	Libre	Gravas coluviales	4-12
Fm Granito de Minas	Granito	Fracturado	Libre	Roca plutónica fisurada	>81,5
Fm Puerto Gómez	Basaltos	Fracturado	Semiconfinado	Roca volcánica meteorizada	>81,5
Fm Cerro Espuelitas	Pelitas y margas	Fracturado	Semiconfinado	Limos y arcillas	0.04-4
Fm Polanco	Rocas carbonatadas	Karstico	Libre	Calizas karstificadas	>81,5
Fm Yerbal	Areniscas masivas	Fracturado	Semiconfinado	Areniscas	0.04-4
Fm Yerbal	Pelitas	Fracturado	Semiconfinado	Limos y arcillas	0.04-4
Fm Las Ventanas	Conglomerado	Poroso	Libre	Areniscas conglomeráticas	4-12
Fm Calabozo y Gibraltar	Rocas carbonatadas	Karstico incipiente	Libre	Calizas y dolomias fisuradas	>81,5
Fm La Toma	Metamargas	Fracturado	Semiconfinado	Margas alteradas	4-12
Fm Don Mario	Metapelitas	Fracturado	Semiconfinado	Limos y arcillas	0.04-4
Fm Cerro de las víboras	Metaignimbritas	Fracturado	Semiconfinado	Rocas volcánicas fisuradas	4-12
Complejo Zanja del Tigre	Rocas carbonatadas con metamorfismo	Karstico incipiente	Semiconfinado	Calcoarenitas	>81,5

A su vez, estas afirmaciones permitieron la agrupación de las unidades que hidrogeológicamente pueden evaluarse como un mismo tipo de acuífero definiendo de manera preliminar el mapa hidrogeológico local de la ciudad de Minas a escala 1:20.000 que contiene la distribución de 6 acuíferos y 1 acuicludo, quienes son explicados en detalle a continuación.

Figura 46

Mapa hidrogeológico local de la ciudad de Minas.



ACUÍFERO TIPO A: Incluye la Formación las Ventanas y el Coluvión formado por la meteorización de las areniscas de la Fm Yermal. Este acuífero se distribuye en una pequeña porción

del área (0.72 Km²) y se define como de tipo poroso, de naturaleza sedimentaria, conformado por niveles de meteorización de hasta unos metros; en términos de grado de confinamiento se cataloga como un acuífero libre con conductividades hidráulicas que oscilan entre 4-12 cm/día.

ACUÍFERO TIPO B: Incluye la Formación Polanco, El complejo Zanja del Tigre, La Formación Calabozo y la Fm Gibraltar, todas integradas por rocas carbonatadas. Este acuífero se distribuye en una buena porción del área (6.26 Km²) y se define como de tipo kárstico, de naturaleza sedimentaria, con desarrollo de karstificación y fracturamiento principalmente en las rocas que componen a la Fm Polanco, catalogada en los antecedentes como una unidad acuífera potencialmente explotable. En términos de grado de confinamiento se cataloga como un acuífero libre a semiconfinado con conductividades hidráulicas mayores a 81,5 cm/día y caudales explotados en el orden de 8000 a 10000 litros/hora.

ACUÍFERO TIPO C: Incluye a la Formación Granito de Minas. Este acuífero se distribuye en una porción moderada del área (3.33 Km²) y se define como de tipo fracturado, de naturaleza ígnea plutónica, con desarrollo de suelos arenosos. Actualmente explotada en el área, con caudales que oscilan entre los 2000 y los 9000 litros/hora, en términos de grado de confinamiento se cataloga como un acuífero libre con conductividades hidráulicas mayores a 81,5 cm/día.

ACUÍFERO TIPO D: Incluye a la Formación Puerto Gomez. Este acuífero se distribuye en una pequeña porción del área (1.01 Km²) y se define como de tipo fracturado, de naturaleza ígnea volcánica, desarrolla buenos niveles de meteorización y en el área es muestreado con caudales promedio de 4000 litros/hora. Su grado de semiconfinamiento se encuentra condicionado por el contacto entre los cuaternarios de la Fm Libertad y la Fm Dolores, quienes actúan como acuícludos, aunque se infiere que esta unidad también puede comportarse como acuífero libre.

ACUÍFERO TIPO E: Incluye a la Formación Yermal, tanto su miembro pelítico como su miembro arenoso, y a la Formación Cerro Espuelitas, ambas del Grupo Arroyo del Soldado GAS. Este acuífero se distribuye en una gran porción del área (8.98 Km²) y se define como de tipo fracturado, de naturaleza sedimentaria, se encuentra dominado por el fuerte control estructural del área que le atribuye su comportamiento hidrogeológico. Explotado actualmente por OSE, con caudales reportados en el orden de 8000 litros/hora. Los niveles que suprayacen la zona vadosa son ricos en limos y arcillas, lo que le atribuye un grado de semiconfinamiento al acuífero.

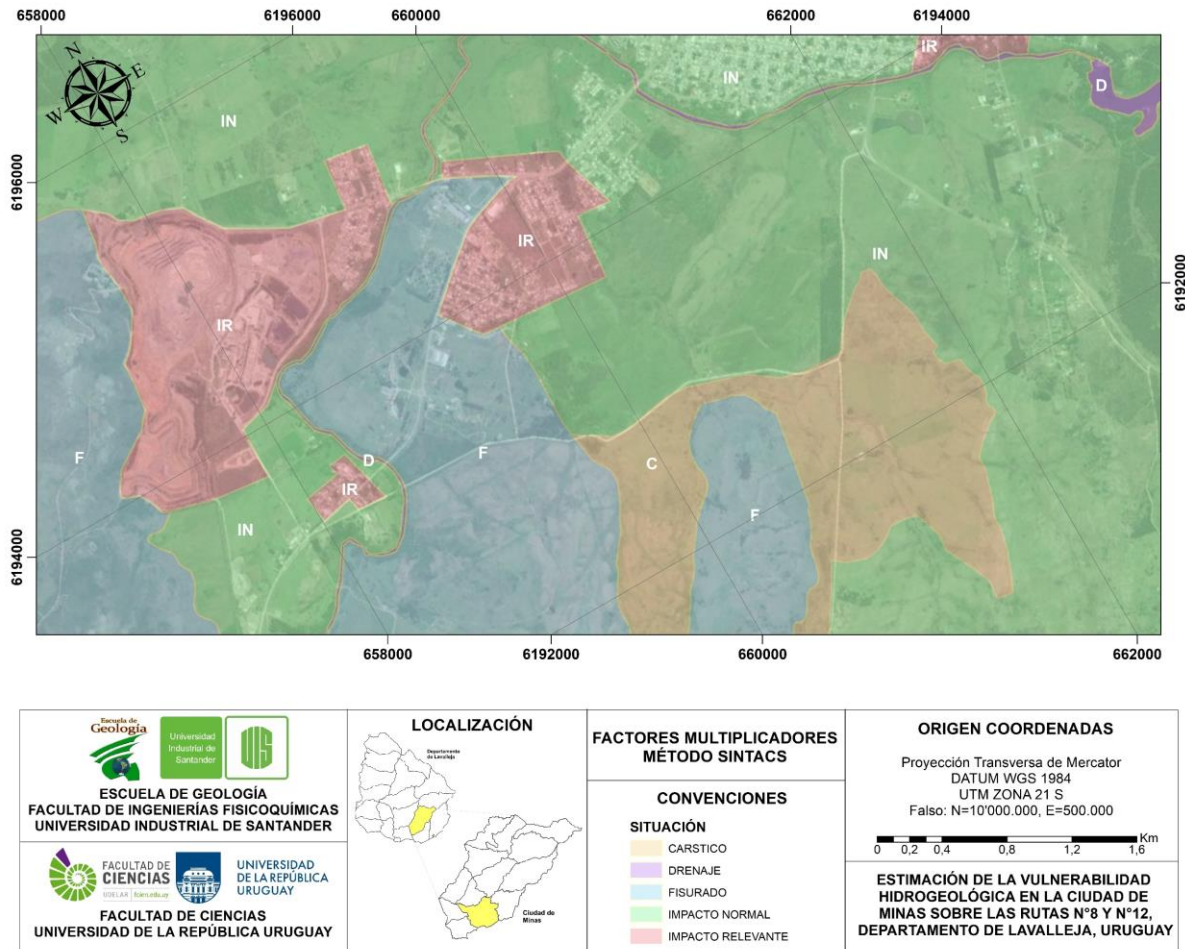
ACUÍFERO TIPO F: Incluye a la Formación Cerro de las Víboras, Formación Don Mario y Formación La Toma, todas incluidas en el Grupo Mina Verdún. Este acuífero se distribuye en una porción moderada del área (3.34 Km²) y se define como de tipo fracturado, de naturaleza volcanosedimentaria, se encuentra dominado por el fuerte control estructural del área que le atribuye su comportamiento hidrogeológico así como por fenómenos de metamorfismo regional. Explotado actualmente con caudales del orden de 2000 litros/hora hasta caudales de 20000 litros/hora reportados por OSE. Los niveles que suprayacen la zona vadosa son ricos en limos y arcillas, lo que le atribuye un grado de semiconfinamiento al acuífero.

ACUICLUIDO TIPO G: Incluye a la Formación Libertad y a la Formación Dolores, de edad cuaternaria. Su carácter composicional, rico en arcillas y limos, le confiere la capacidad de absorber agua lentamente pero no de transportarla hacia niveles inferiores, por lo que integran un acuícluido con un área de 2.94 Km².

Teniendo consolidadas todas las variables del modelo SINTACS, se debe realizar la respectiva reclasificación con las gráficas reportadas en la literatura y generar la zonificación de los factores multiplicadores que se expone en la Figura 47.

Figura 47

Zonificación de factores multiplicadores método SINTACS.



Para esta última distribución de escenarios, se tuvieron en cuenta las características anteriormente mencionadas como son: Los afloramientos de la Formación Polanco con evidencia de karstificación en superficie para atribuir el factor (C); las zonas dominadas por el control estructural del conjunto de sinclinales y anticlinales que afectan la zona y que conforman los acuíferos fisurados (F); las áreas que se encuentran influenciadas por una red de drenaje natural o artificial, en este caso la pequeña porción influenciada por el Arroyo San Francisco y el Arroyo La Plata (D); las zonas con impacto relevante donde se incluye los asentamientos urbanos sin

servicios de saneamiento (aguas residuales) y las zonas intensamente industrializadas, en este caso la cantera Verdún (IR), y finalmente, todas aquellas zonas con impacto normal (IN) que incluye la porción del casco urbano de Minas y algunos barrios aledaños que cuentan con cobertura total de saneamiento, así como zonas sin cultivos extensivos ni actividades antrópicas dominantes. La reclasificación de las capas temáticas y el producto final de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS es mostrado en el capítulo de resultados.

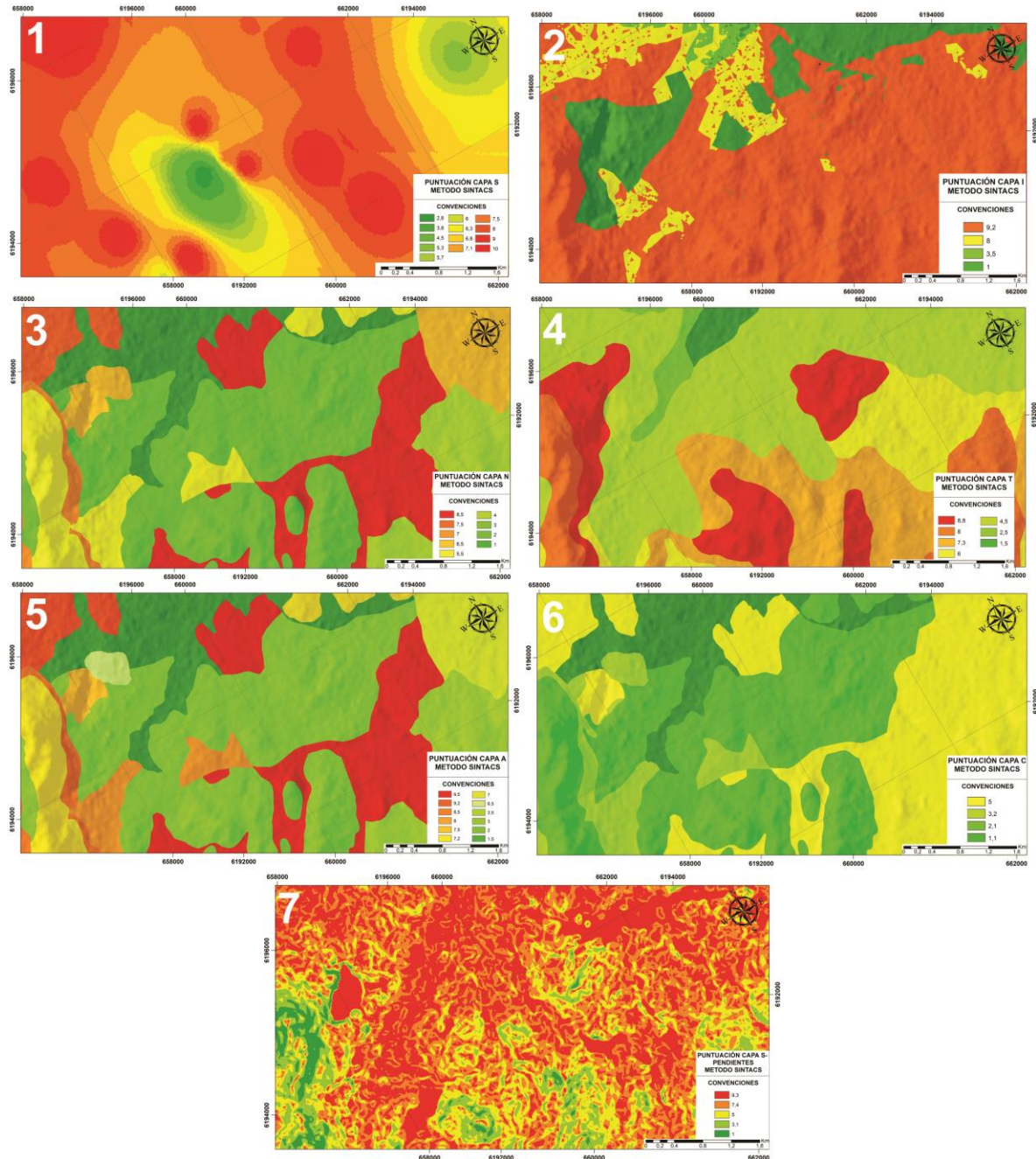
6.2 Desarrollo del modelo GOD

La metodología GOD involucra dos variables anteriormente estimadas para el modelo SINTACS, éstas son la naturaleza del estrato suprayacente o zona vadosa del acuífero, y la distancia del nivel de agua subterránea o profundidad del nivel freático. Así mismo, la Tabla 9 expone la caracterización del grado de confinamiento hidráulico de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas, por lo que este tercer parámetro se encuentra implícitamente calculado. En el capítulo de resultados se expone la reclasificación correspondiente de cada una de las capas de acuerdo con las tablas de ponderación respectivas para esta metodología y su conversión a formato ráster para la correcta aplicación de la ecuación que permitirá obtener el mapa índice de vulnerabilidad intrínseca en el área.

7. Resultados

7.1 Resultados de vulnerabilidad hidrogeológica por el método SINTACS

Los mapas fueron reclasificados de acuerdo con las puntuaciones definidas para el modelo SINTACS y convertidos a formato ráster como se muestra en la Figura 48.

Figura 48*Reclasificación de mapas de parámetros SINTACS.*

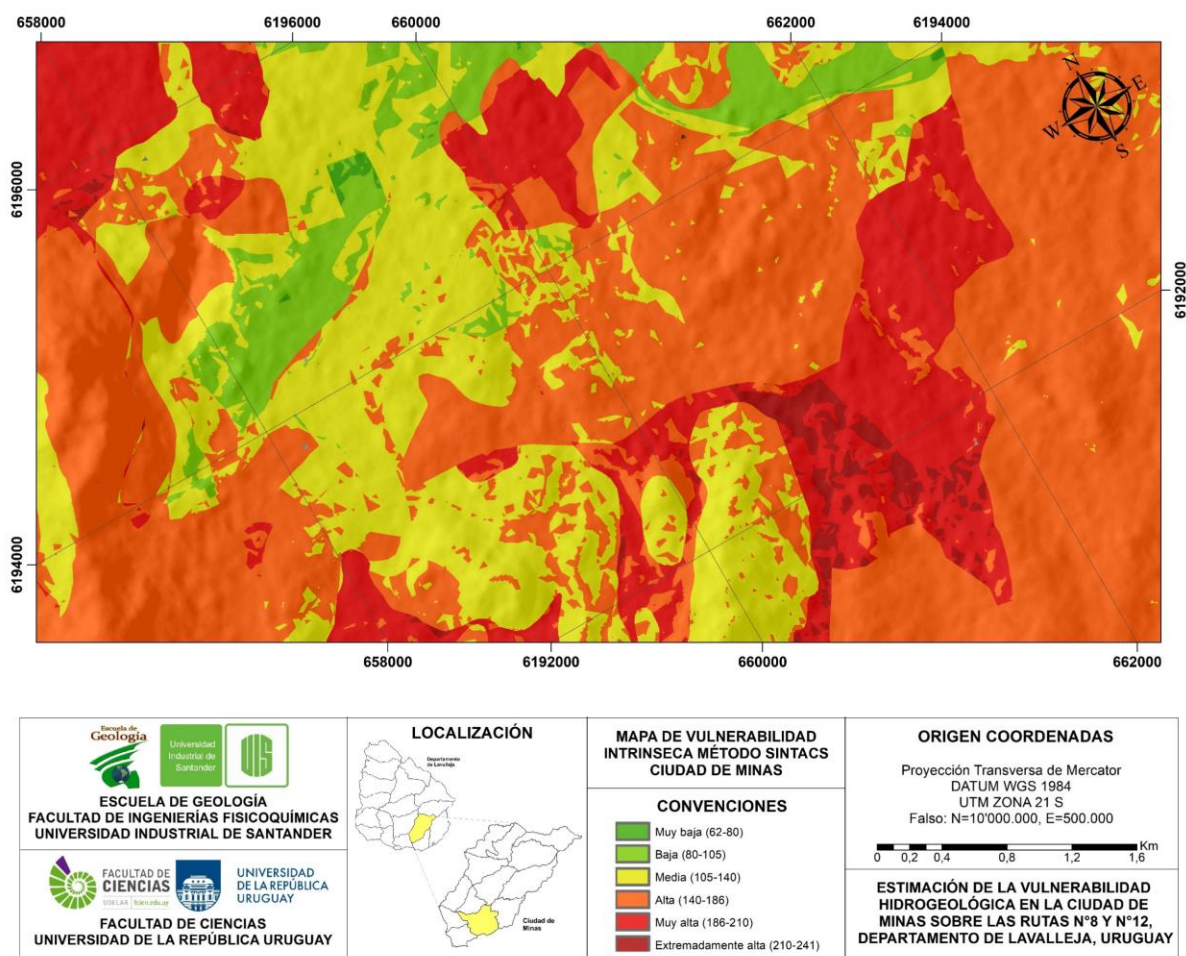
Nota. (1) Corresponde a la reclasificación de la capa temática de profundidad del nivel freático (S en SINTACS) con valores que oscilan entre 2,8 a 10 pts; (2) Infiltración (I en SINTACS) con valores entre 1 a 9,2 pts;

(3) Capacidad de atenuación de la zona no saturada (N en SINTACS) con valores entre 1 a 8,5 pts; (4) Efecto de mitigación de los suelos (T en SINTACS) con valores entre 1,5 a 8,8 pts; (5) Características hidrogeológicas del acuífero (A en SINTACS) con valores entre 1,5 a 9,5 pts; (6) Conductividad hidráulica (C en SINTACS) con valores de 1,1 a 5 pts y (7) Pendientes (S en SINTACS) con valores entre 1 a 9,3 pts.

El resultado de zonificación de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS se expone en la Figura 49.

Figura 49

Mapa de vulnerabilidad intrínseca de la ciudad de Minas por el método SINTACS.



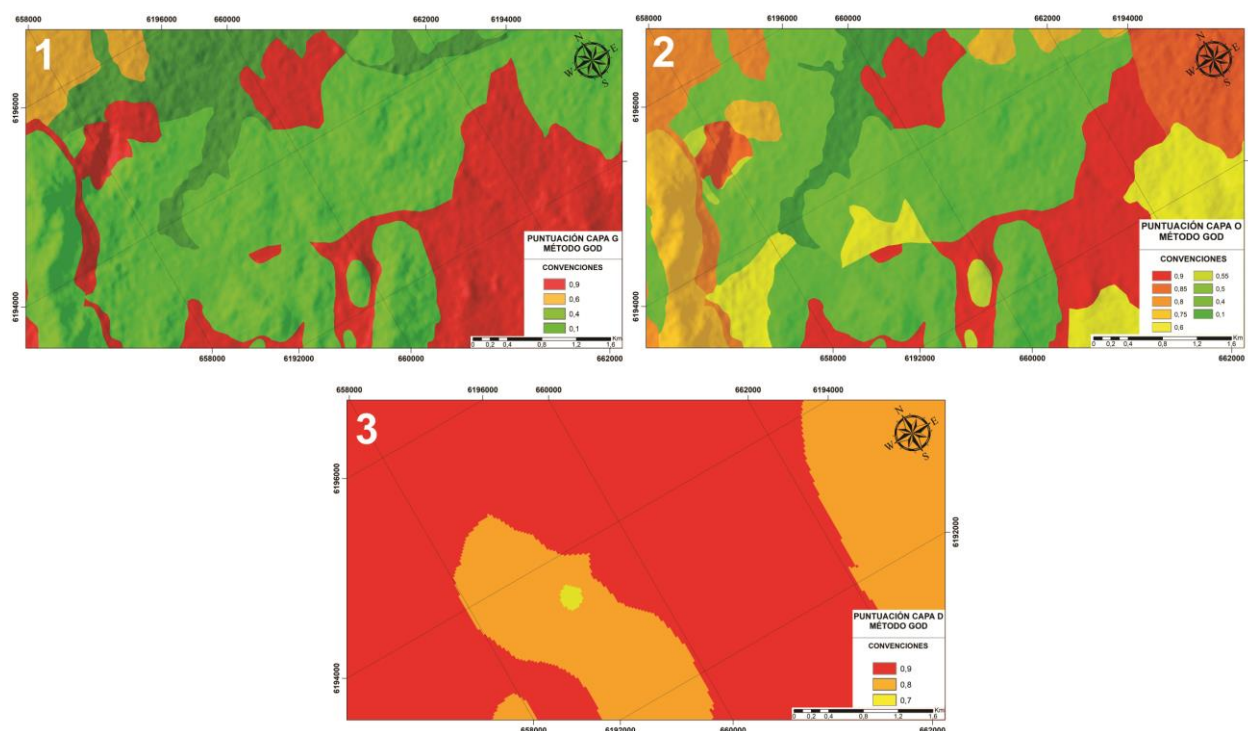
El mapa de vulnerabilidad intrínseca muestra un rango de vulnerabilidad *Muy baja* (62-80 pts) con un área de 0,047 Km², *Baja* (80-105 pts) con un área de 1,67 Km², *Media* (105-140 pts) con un área 6,83 Km², *Alta* (140-186 pts) con un área 13,28 Km², *Muy alta* (186-210 pts) con un área 4,23 Km², y *Extremadamente alta* (210-241 pts) con un área 0,43 Km²

7.2 Resultados de vulnerabilidad hidrogeológica por el método GOD

Los mapas fueron reclasificados de acuerdo con las puntuaciones definidas para el modelo GOD y convertidos a formato ráster como se muestra en la Figura 50.

Figura 50

Reclasificación de mapas de parámetros GOD.

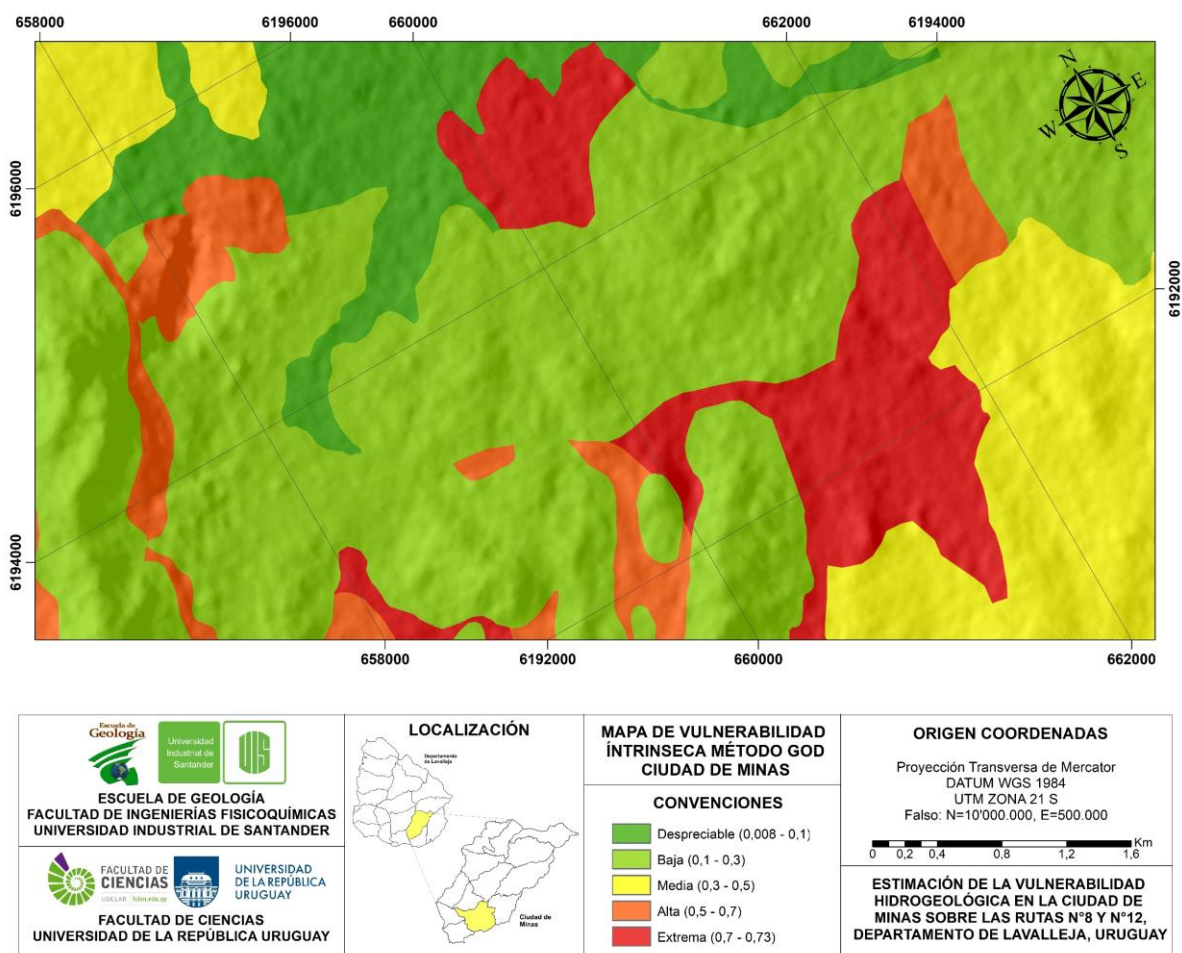


Nota. (1) Corresponde a la reclasificación de la capa temática de grado de confinamiento hidráulico (G en GOD) con valores que oscilan entre 0,1 a 0,9 pts; (2) Ocurrencia del sustrato suprayacente (O en GOD) con valores entre 0,1 a 0,9 pts y (3) Distancia al nivel del agua subterránea (D en GOD) con valores entre 0,7 a 0,9 pts.

El resultado de zonificación de vulnerabilidad intrínseca por el método GOD se expone en la Figura 51.

Figura 51

Mapa de vulnerabilidad intrínseca de la ciudad de Minas por el método GOD.



El mapa de vulnerabilidad intrínseca muestra un rango de vulnerabilidad *Despreciable* (0,001-0,1 pts) con un área de 2,94 Km², *Baja* (0,1-0,3 pts) con un área de 13,98 Km², *Media* (0,3-0,5 pts) con un área 4,34 Km², *Alta* (0,5-0,7 pts) con un área 1,98 Km², y *Extrema* (0,7-0,73 pts) con un área 3,33 Km².

7.3 Clasificación de aguas

Los resultados del análisis de iones mayoritarios para las 8 muestras seleccionadas se exponen en la tabla 10.

Tabla 10

Resultados de iones mayoritarios en concentraciones mg/l.

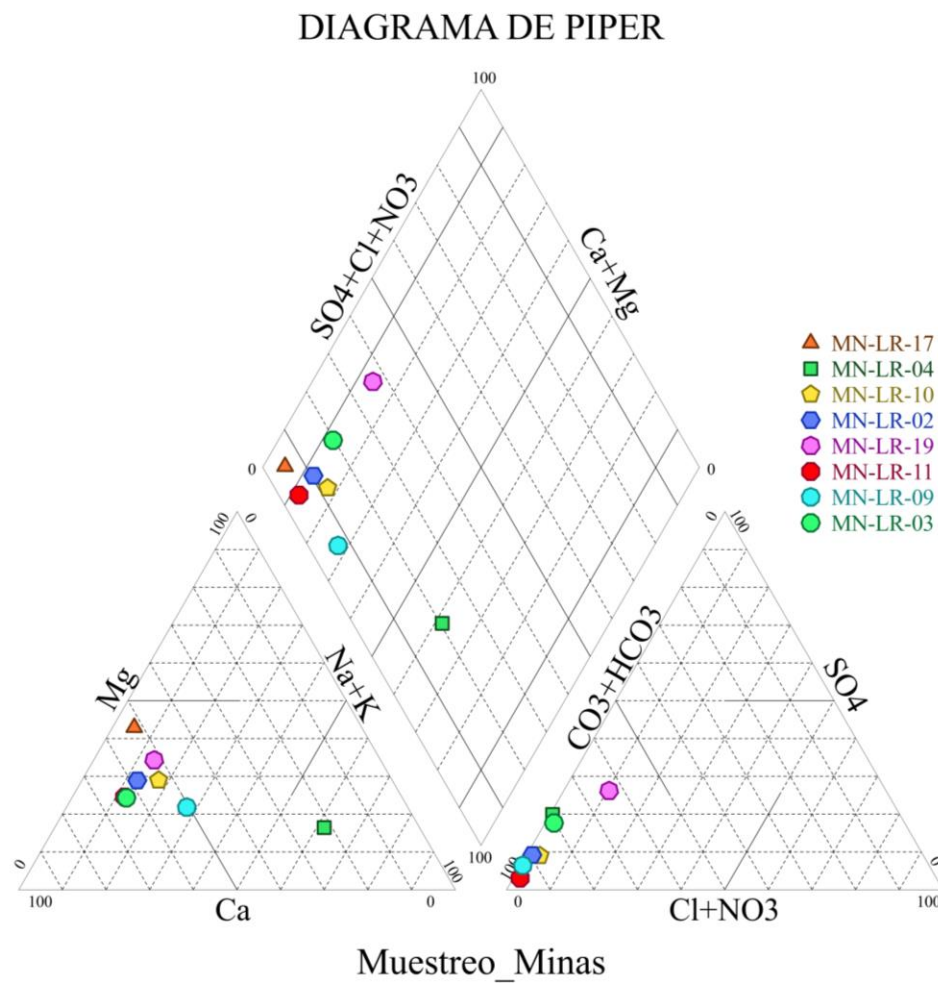
CÓDIGO POZO	COORDENADAS		LITOLOGÍA	IONES MAYORITARIOS (En mg/l)							
	X	Y		Cl-	NO3-	SO4--	HCO3-	Na+	K+	Mg++	Ca++
MN-LR-02	658310	6193712	Pelitas	1,22	0,023	12,3	152	9,4	1	12	40
MN-LR-03	660302	6194631	Carbonatos	1,22	8,53	71,4	413	16	<1.0	17	73
MN-LR-04	663048	6193188	Carbonatos	1,39	1,3	103	523	190	3,1	27	59
MN-LR-09	661027	6191975	Carbonatos	0,42	0,75	15,6	288	39	7,1	18	69
MN-LR-10	660557	6192981	Pelitas	2,02	0,14	8,1	101	8,8	<1.0	8,2	25
MN-LR-11	659672	6193364	Pelitas	2,67	0,035	7,02	281	16	<1.0	18	77
MN-LR-17	658321	6192613	Pelitas	1,32	0,76	9,15	266	5,8	<1.0	29	58
MN-LR-19	658494	6196313	Basaltos	24,4	20,4	123	379	26	ND	34	85

En este orden, las muestras de agua evaluadas por medio de las perforaciones MN-LR-02, MN-LR-10, MN-LR-11 y MN-LR-17 se asocian a la Formación Yermal, unidad hidrogeológica que conforma acuíferos fisurados en el área. Por otro lado, las perforaciones MN-LR-03 Y MN-LR-09 explotan al acuífero karstico de la Formación Polanco, la muestra de agua obtenida del pozo MN-LR-04 explota al acuífero karstico del Complejo Zanja del Tigre, y finalmente, la perforación MN-LR-19 explota a la Formación Puerto Gómez.

A continuación se presenta la clasificación de las muestras de agua a través de los diagramas de Piper y Stiff graficados en el software de uso libre Diagrammes.

Figura 52

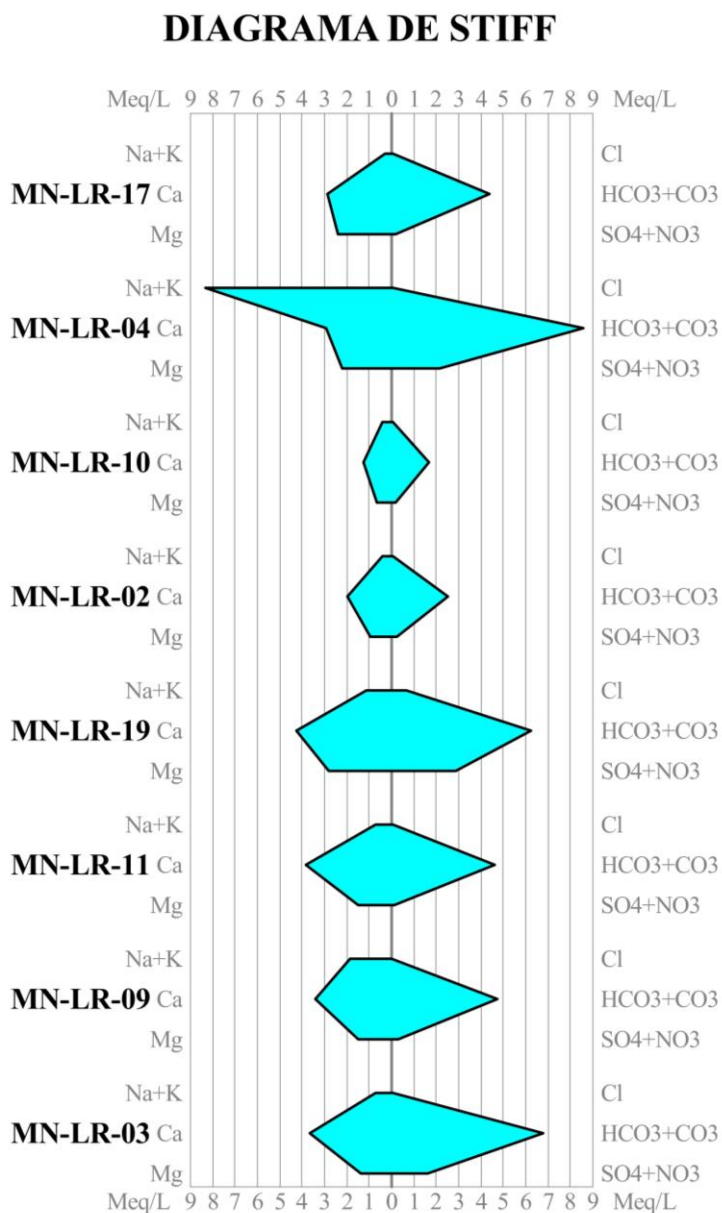
Clasificación de aguas por medio del diagrama de Piper.



Se establece que la mayor parte de las muestras de agua se encuentran en las facies Bicarbonatada cálcica y/o magnésicas, a excepción de la muestra MN-LR-04 que indica una facie Bicarbonatada sódica. En general, se trata de aguas jóvenes, geoquímicamente poco evolucionadas, con tiempos de residencia cortos en los flujos subterráneos.

Figura 53

Clasificación de aguas por medio del diagrama de Stiff.

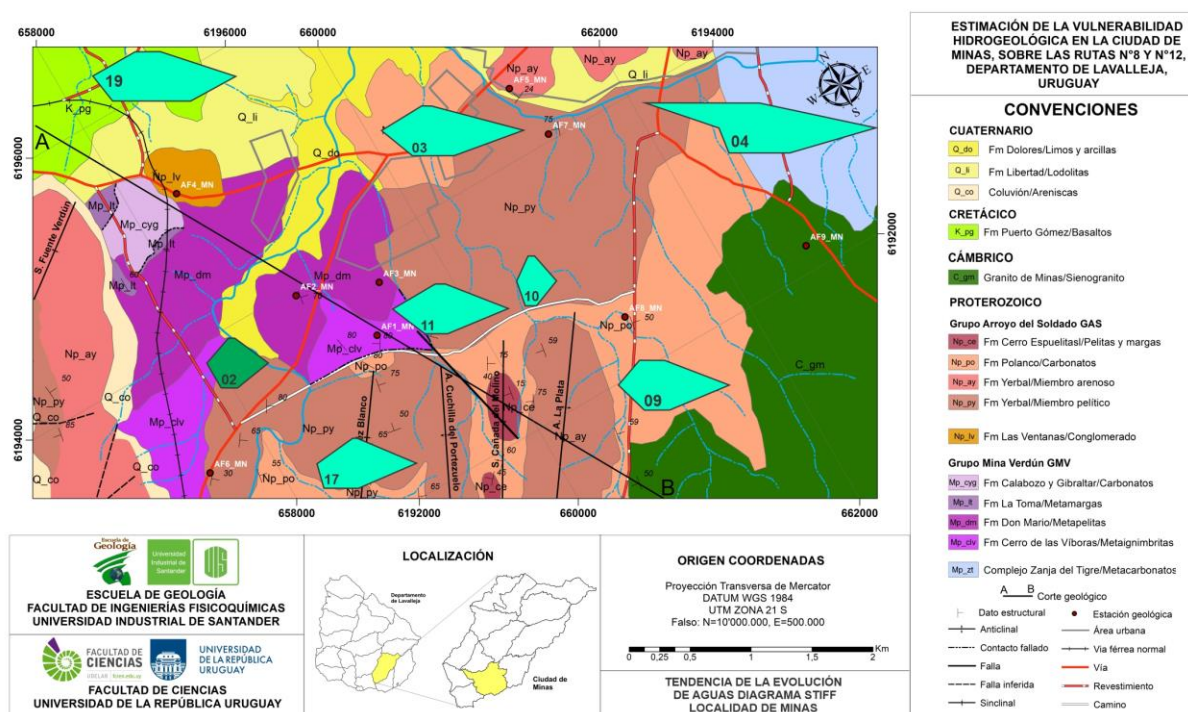


A través de esta clasificación, se puede apreciar que la mayor parte de las muestras esquematizan aguas subterráneas naturales, en facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas. Por su parte, la muestra MN-LR-04 presenta una tendencia a intercambio iónico, asociado a su

naturaleza bicarbonatada sódica. La distribución de los diagramas Stiff en el área de estudio es esquematizada en la figura 54.

Figura 54

Tendencia de la evolución de aguas por medio del diagrama Stiff en la localidad de Minas.

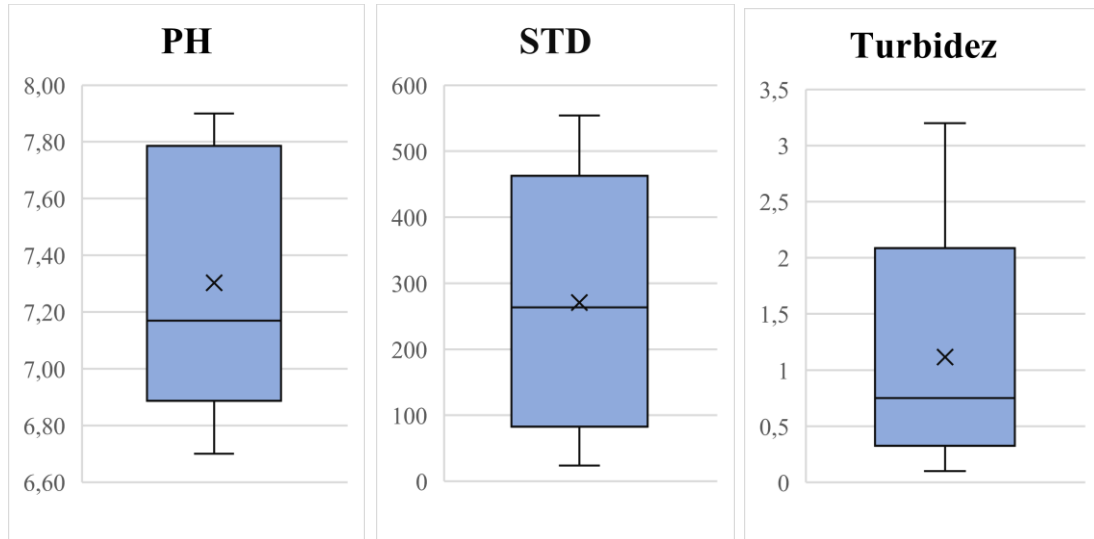


7.4 Caracterización fisicoquímica de las aguas

Con el fin de estimar el rango de valores encontrados en cada uno de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ, así como la porción de iones mayoritarios presentes en el agua según los límites establecidos en la norma de potabilidad Uruguay, se plantean esquemáticamente los siguientes diagramas de caja y bigotes, cuya explicación se expone a continuación.

Figura 55

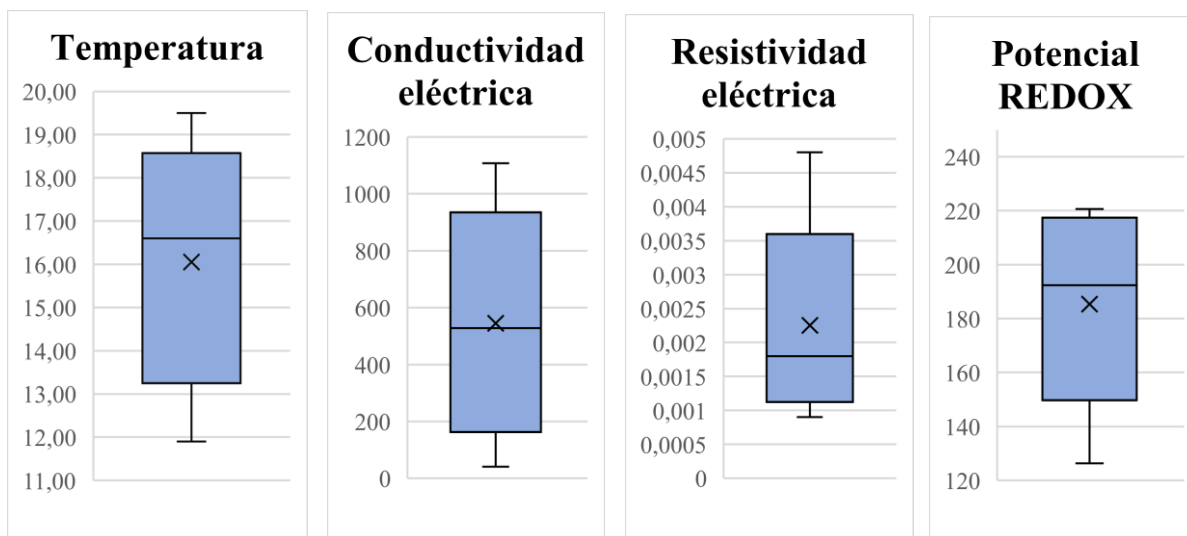
Diagramas de caja para los parámetros PH, STD y Turbidez.



Los valores de PH oscilan en un rango de 6,7 a 7,9; cumpliendo con los límites establecidos por la norma Uruguaya de PH entre 6-9 para agua potable. Así mismo, la medición de Sólidos Totales Disueltos (STD) en el agua indicó valores entre 24 y 554 ppm (1 ppm=1 mg/l); la norma indica valores máximos de 700 mg/l. Finalmente, la turbidez se encuentra en un rango de 0,1-3,2 FNU; valores por debajo del máximo establecido de 5 UNT (1 NTU=1 FNU).

Figura 56

Diagramas de caja para los parámetros Temperatura, Conductividad eléctrica, Resistividad eléctrica y potencial REDOX.

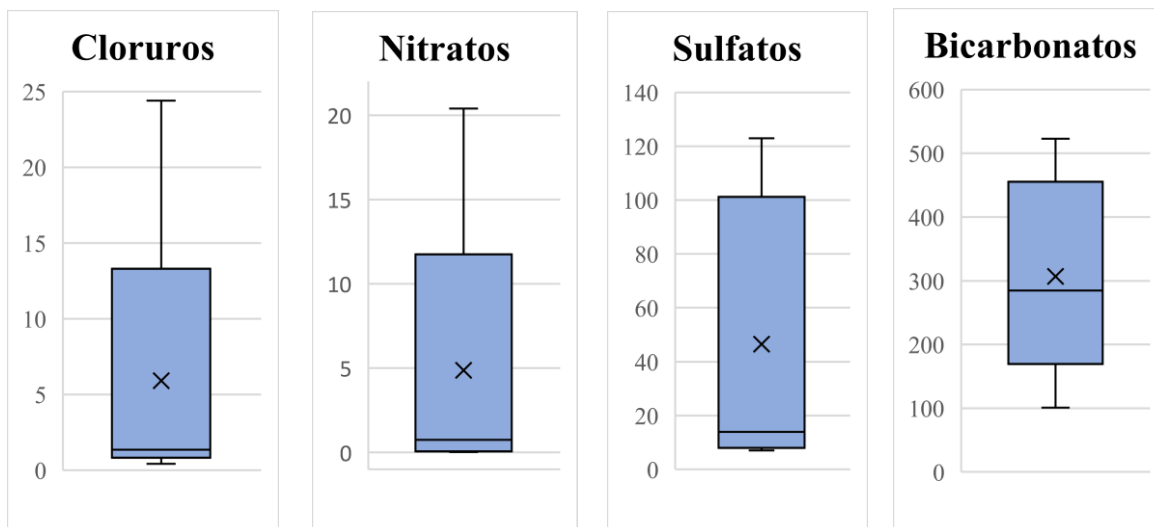


La temperatura del agua presentó un rango entre 11,9° C y 19,5 °C; valores que se encuentran dentro del límite máximo de 25° C establecido por la norma Interna de Calidad de Agua Potable de OSE (2006). La conductividad eléctrica reportó valores entre 41 a 1108 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la resistividad eléctrica valores entre 9×10^{-4} y $48 \times 10^{-4} \text{ M}\Omega/\text{cm}$ y el potencial REDOX un rango entre 126,3 y 220,6 mV. De acuerdo a la estimación de la calidad de agua de irrigación propuesta por Jenkins (1983) en Rodriguez (2009), los valores de conductividad eléctrica se encuentran en un rango permisible (750- 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Según la armonización de los estándares de agua potable en las Américas basados en las guías de la Organización Mundial de la Salud OMS y consignados en Truque (2012), se establece un rango de conductividad eléctrica permisible entre 400 y 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por otra parte, la OMS estableció en 1971 al potencial redox como un indicador para la medición de la desinfección del agua bebida en humanos, de bacterias, hongos y levaduras,

estableciendo que 650 mV es el valor mínimo recomendable (EwTech, 2020). El rango mVORP medido en campo en algunas de las muestras se encuentra por debajo de esta estimación.

Figura 57

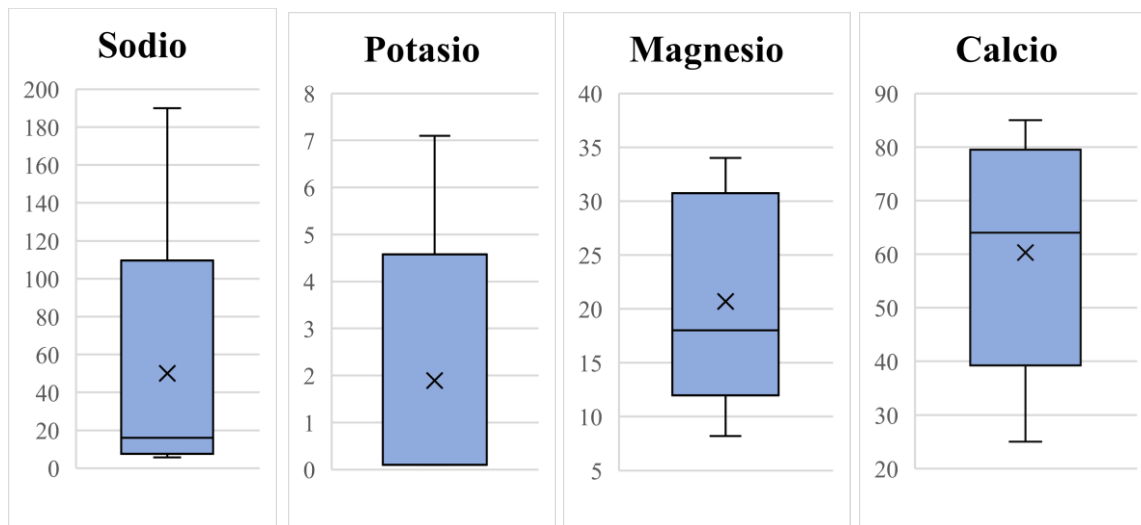
Diagramas de caja para los aniones mayoritarios.



El ión Cloruro oscila entre 0,42 y 24,4 mg/l, valores dentro del máximo de 300 mg/l establecido en la norma de potabilidad, el ión Nitrato se encuentra en un rango entre 0,023 y 20,4 mg/l de un máximo de 10 mg/l. El dato atípico de 20,4 mg/l corresponde a la muestra MN-LR-19, quién en la clasificación de aguas por el diagrama Piper, se mantiene como un agua Bicarbonatada pero presenta una tendencia a comportarse como agua sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica. El ión Sulfato reportó valores de 7,02 a 123 mg/l de un máximo de 400 mg/l. Finalmente, el ión Bicarbonato presenta concentraciones de 101 a 523 mg/l, valores que muy cercanos y a su vez que exceden el límite máximo de dureza total en CaCO_3 de 500 mg/l. Este dato atípico corresponde a la muestra MN-LR-04 clasificada como un agua bicarbonatada sódica.

Figura 58

Diagramas de caja para los cationes mayoritarios.



El ión Sodio reporta valores entre 5,8 y 190 mg/l, rango que se encuentra dentro del máximo permitido por la norma Uruguaya de 200 mg/l. Por su parte, el ión Potasio fue estimado en bajas concentraciones con concentraciones menores a 1 mg/l en gran parte de las muestras hasta máximos de 7,1 mg/l. El ión Magnesio presentó valores entre 8,2 y 34 mg/l, concordante con los máximos estimados en la norma de potabilidad de las Américas que alcanzan los 150 mg/l. Finalmente, el ión Calcio presentó concentraciones entre 25 y 85 mg/l, valores ubicados dentro del rango estimado en la norma de potabilidad de las Américas con máximos de hasta 200 mg/l.

8. Discusión

El análisis comparativo de los resultados de zonificación de vulnerabilidad intrínseca obtenidos por las metodologías SINTACS y GOD presentó semejanzas y diferencias en la

distribución y extensión de cada una de las categorías de puntuación descritas; como se indica a continuación:

De acuerdo a la metodología SINTACS, los sectores calificados con puntuaciones >210 pts corresponden a zonas con vulnerabilidad extrema; una pequeña porción fue catalogada en esta clasificación y corresponde al área de afloramiento de la Formación Polanco (Carbonatos) hacia el sector SE, que de acuerdo a las características previamente evaluadas en esta unidad, entre las que se encuentran los niveles estáticos someros, el desarrollo de karstificación, el grado de pendientes, la naturaleza de la zona vadosa, entre otras consideraciones, permitieron la selección de las puntuaciones más altas en las reclasificaciones efectuadas para cada capa temática. En conjunto, la definición de un escenario cárstico como factor de ponderación adicional en la metodología, permitió obtener el rango de mayor valoración de vulnerabilidad hidrogeológica para esta litología.

De la misma manera, la metodología GOD asigna una valoración de vulnerabilidad extrema en puntuaciones que superen los 0,7 pts. Así pues, gran parte de las áreas de afloramiento de la Formación Polanco, al N y al SE del área, son catalogadas con esta puntuación. Si bien es coherente afirmar que en ambas metodologías la existencia de rocas carbonatadas favorece el riesgo a que el acuífero pueda verse afectado por una carga contaminante que se transporte por medio de las fracturas y disolución que integran la porosidad secundaria del mismo, y en consecuencia se asigne los valores más altos de vulnerabilidad en la zonificación, resulta coherente la integración adicional del factor de puntuación de escenarios de la metodología SINTACS, así como el parámetro de recarga del acuífero, para lograr estimar la vulnerabilidad extrema en sectores puntuales y no evaluarla de manera tan generalizada en toda el área de afloramiento de la litología carbonática.

La siguiente clasificación asignada por la metodología SINTACS corresponde a un grado de vulnerabilidad muy alta, con valores que oscilan entre 180-210 pts. Esta categoría fue distribuida en la porción restante de afloramiento de la Formación Polanco, e incluyó de igual manera la pequeña porción cartografiada para los carbonatos del Grupo Mina Verdún (Formación Calabozo y Gibraltar) y los basaltos de la Formación Puerto Gómez. Se infiere entonces que la estimación de vulnerabilidad muy alta en las litologías carbonáticas se lleva a cabo con las premisas descritas en el anterior apartado. Por su parte, la Formación Puerto Gómez, donde se evaluaron en campo niveles estáticos someros así como buenos caudales de extracción, permitió inferir una buena conductividad hidráulica a través de los mantos de alteración y porosidad primaria y secundaria reportada para esta litología previamente por otros autores. Dichas consideraciones en conjunto dieron como resultado el grado de vulnerabilidad descrito para esta formación en particular.

La metodología GOD no asume en su evaluación el rango de clasificación muy alta, por lo que se continúa con el análisis de la valoración *alta* obtenida en ambos modelos.

El grado de vulnerabilidad alta, quién es asignado en la metodología SINTACS para puntuaciones obtenidas en el rango de 140-186 pts, es el que mayor distribución desarrolla en el área de estudio. Con esta valoración fueron catalogadas los Carbonatos del Complejo Zanja del Tigre, el Granito de Minas, el Conglomerado de la Formación Las Ventanas, el Coluvión de Cuarzoarenitas, las margas de la Formación La Toma, las metaignimbritas de la Formación Cerro de Las Víboras, una porción de pelitas de la Formación Yermal hacia el SE, y una porción de areniscas masivas de la Formación Yermal hacia el W (Hacia el Cerro de Los Chivos y el Cerro Verdún), donde el control estructural dominado por el Sinclinal Verdún y zonificado por medio del escenario Fisurado, apoya el desarrollo de este índice de vulnerabilidad. De manera general,

los resultados obtenidos en esta clasificación están condicionados fundamentalmente a factores como la tipología de suelos, la naturaleza de la zona vadosa, el índice de recarga del sistema y la conductividad hidráulica; y en menor medida apoyados por la zonificación de escenarios, pues en esta calificación existe heterogeneidad tanto en condiciones de fisurado, en condiciones drenaje, de impacto relevante y de impacto normal.

Por su parte, la metodología GOD asigna el índice de vulnerabilidad alta (0,5-0,7 pts) a la porción restante de rocas carbonáticas de la Formación Polanco, hacia el SW del área, así como a los carbonatos de la Formación Gibraltar y la Formación Calabozo, las margas de la Formación La Toma, el Conglomerado de la Formación Las Ventanas y el Coluvión de Cuarzoarenitas, fundamentalmente por el grado de confinamiento asignado a dichas litologías; esto sugiere que por medio de esta metodología son evaluadas bajo esta categoría una parte de las unidades zonificadas con vulnerabilidad muy alta y alta en la metodología SINTACS, pero que, en sentido de distribución, el modelo SINTACS sugiere una mayor extensión abarcando a su vez litologías aflorantes hacia el Este (Complejo Zanja del Tigre y Granito de Minas).

En este orden, la siguiente clasificación asignada por la metodología SINTACS es la vulnerabilidad media, con valores entre 105 y 140 pts. Dentro de esta zonificación se incluye la porción restante de la Formación Yermal, tanto su miembro arenoso como su miembro pelítico, la Formación Cerro Espuelitas y una fracción de la Formación Don Mario y de la Formación Libertad. Como se evaluó con anterioridad, la Formación Libertad se comporta en el área como un acuícludo y le atribuye un grado de semiconfinamiento a la Formación Puerto Gómez en las áreas que los suprayace. Así mismo, una parte de esta distribución es controlada por el escenario *Fisurado*, con la incidencia de pliegues anticlinales y sinclinales que generan un fuerte dominio estructural sobre estas formaciones, y que conlleva a que se comporten como acuíferos con

porosidad secundaria por fracturamiento, pues su carácter textural (areniscas de grano fino, limos y en menor proporción arcillas) y el grado de compactación y empaquetamiento de estas litologías no permiten el desarrollo de una porosidad primaria.

Por su parte, la metodología GOD asigna una categoría de vulnerabilidad media, a las puntuaciones obtenidas en un rango de 0,3 a 0,5 pts. En esta distribución fueron incluidas las litologías del Granito de Minas y los Basaltos de la Formación Puerto Gomez, fundamentalmente por la naturaleza de su zona vadosa y por el grado de confinamiento que presentan (Libres a semiconfinados). En contraste, estas litologías son asignadas con puntuaciones mucho mayores en el modelo SINTACS (grado de vulnerabilidad alta y muy alta) por la integración de parámetros como el tipo de textura de suelos, que aumentan su valoración.

Finalmente, para la evaluación de la vulnerabilidad baja y muy baja, el modelo SINTACS asigna puntuaciones de 105 a 80 pts y de 80 a 62 pts respectivamente. Bajo esta denominaciones se incluye a la Formación Dolores y la Formación Libertad, hacia el N y NW de la zona, incluyendo una porción del casco urbano de la ciudad de Minas, dominada por escenarios de condiciones normales y condiciones de impacto relevante. Los resultados de esta zonificación son coherentes con las propiedades litológicas e hidráulicas evaluadas en dichas litologías, pues estos cuaternarios se comportan como acuícludos en el área,; su carácter litológico rico en limos y arcillas, y la formación de suelos con esta misma naturaleza textural, le confieren un grado de protección a los acuíferos subyacentes, condicionado a su vez por el déficit de recarga en estos sectores puntuales que no permiten una infiltración directa sino apoyan el índice de esorrentía hacia litologías más permeables.

En contraste, la zonificación de vulnerabilidad baja por el método GOD es la que presenta mayor área de ocupación. Con una valoración de 0,1 a 0,3 pts, se asume bajo esta denominación a

las litologías restantes del Grupo Arroyo del Soldado (Formación Yermal, tanto su miembro pelítico como su miembro arenoso; y la Formación Cerro Espuelitas), las litologías restantes del Grupo Mina Verdún (Formación Don Mario y Formación Cerro de las Víboras), y los carbonatos del Complejo Zanja del Tigre. Esta calificación se encuentra dominada principalmente por el grado de semiconfinamiento de dichos acuíferos. Por último, un índice de vulnerabilidad intrínseca despreciable ($<0,1$ pts) en este modelo, es asignado a los Cuaternarios Libertad y Dolores, resultados coherentes con la valoración de estos acuíferos en la metodología SINTACS.

Si bien los dos resultados de zonificación son aceptables, pues asumen como el mayor grado de vulnerabilidad aquellas áreas donde afloran rocas carbonatadas afectadas por fenómenos de karstificación, y a su vez, definen el grado de vulnerabilidad bajo y/o despreciable en áreas donde dominan litologías limoarcillosas masivas con conductividades hidráulicas bajas, el modelo SINTACS, a través de la integración de parámetros adicionales tanto de puntuación como de peso, expone una distribución más acorde con las características analizadas en el área (Control estructural, escenarios puntuales de vulnerabilidad), presentando transiciones coherentes entre cada categoría, en contraste con la metodología GOD que para este caso en particular estuvo condicionada por la geometría de la cartografía geológica realizada en el área de estudio y cuyos resultados mostraron transiciones abruptas de vulnerabilidad baja a vulnerabilidad extrema (citando el ejemplo del contacto entre las pelitas de la Formación Yermal y los carbonatos de la Formación Polanco), cuando por el método SINTACS el contacto entre dichas litologías se denota iniciando con una vulnerabilidad extrema, vulnerabilidad muy alta, vulnerabilidad alta hasta alcanzar un grado de vulnerabilidad media.

En apoyo a los resultados de zonificación trabajados por medio del SIG, la investigación contempló la valoración de parámetros fisicoquímicos del recurso superficial y subterráneo

medidos in situ, y la clasificación de estas aguas para contrastar sus concentración y tendencia hidroquímica en el área a partir del análisis de sus iones mayoritarios. En consecuencia, se logró estimar que si bien la dureza en 7 de las 8 muestras obtenidas aún se encuentran dentro del rango de valores aceptados por la norma, por medio de la entrevista realizada a los propietarios de cada uno de los pozos relevados, y tomando como caso puntual la perforación MN-LR-03 ubicada sobre carbonatos de la Formación Polanco, y con una concentración de 413 mg/l de CaCO_3 , el uso del recurso subterráneo era destinado a riego de un vivero privado, y debió ser reemplazado por otra fuente de abastecimiento pues el carácter de dureza del agua comenzó a afectar gravemente los cultivos. Bajo esta premisa, y según la clasificación de dureza realizada por Bessonart y Ciarán (2009) que se expone en la Tabla 11, este pozo contiene un agua dura; el pozo MN-LR-04, construido sobre rocas carbonáticas (Complejo Zanja del Tigre) emana un agua muy dura, superando el límite de concentración de CaCO_3 aceptado en la normativa de potabilidad Uruguay; esquematizado por medio del diagrama de Piper como un agua Bicarbonatada Sódica y en el diagrama Stiff con una tendencia de Intercambio Iónico. Así mismo, la perforación MN-LR-19, que explota a los basaltos de la Formación Puerto Gomez, emana un agua dura, con valores de 379 mg CaCO_3 /litro y una concentración de Nitratos (20,4 mg/l) que excede el límite permitido de 10 mg/l. Finalmente, la perforación MN-LR-09, que explota al acuífero kárstico de la Formación Polanco, presenta aguas de carácter medianamente duro y las perforaciones MN-LR-11 Y MN-LR-17, sobre las pelitas de la Formación Yermal, exponen esta misma condición.

Tabla 11*Rango de dureza del agua.*

Dureza del agua	
CaCO ₃ en mg/l	Clasificación
12,6-89	Muy blanda
89-178	Blanda
178-267	Medianamente blanda
267-356,8	Medianamente dura
356,8-445	Dura
>445	Muy dura

Nota. Tomado y adaptado de Bessonart y Ciarán (2009).

Con lo anterior se puede inferir que el grado de heterogeneidad de las litologías en la zona de estudio ha permitido que la interacción agua-medio favorezca un intercambio iónico pues las muestras analizadas con altas concentraciones de Bicarbonato contienen además los mayores índices del ión Sulfato (Hasta 103 mg/l) y del ión Sodio (Hasta 190 mg/l) lo que supone que minerales ricos en SO₄²⁻ como la anhidrita y el yeso contribuyen a la disolución de estos aniones en contacto con el agua subterránea. Según la secuencia de Chevotarev, mostrada en la Figura 26, las aguas bicarbonatadas, quienes presentan el menor tiempo de residencia en el acuífero, evolucionan geoquímicamente inicialmente con el predominio de los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺ y sufriendo fenómenos de intercambio catiónico que las enriquecen del catión Na⁺, tal y como ocurre en la muestra MN-LR-04. Padilla y García (2012) apoyan esta teoría, pues indican que las aguas subterráneas de reciente infiltración interactúan y evolucionan por el medio geológico que les aporta una variación en su composición iónica, hasta su recorrido final y disposición como aguas de descarga.

9. Conclusiones

La ciudad de Minas, en Uruguay, contempla una profunda historia geológica que involucra una secuencia de rocas datadas desde el Mesoproterozoico hasta el Cuaternario, afectadas por un juego de pliegues anticlinales y sinclinales orientados de manera cuasi paralela en dirección NE-SW, lo que sugiere el dominio esfuerzos compresivos que afectaron las litologías aflorantes.

El resultado del balance hidrológico de suelos a largo plazo demuestra pérdidas por evapotranspiración real anual de hasta 764,12 mm/año para la estación *MINAS CIUDAD* y 748 mm/año para la estación *MINAS CAMPANERO*, estimando de este modo valores máximos de recarga potencial de 315 mm/año en el sistema.

El plano de profundidad del nivel freático en la localidad de Minas por el método de interpolación IDW confirma la presencia de diferentes tipologías de acuíferos en el área, con niveles estáticos medidos en campo que varían de los 0 a los 26 metros.

Se identificaron 7 tipos de suelo en el área de estudio, donde sobresale la distribución de suelos con textura de Francos y Arenos franco gravillosos.

Con respecto a la cartografía hidrogeológica a escala local, se realizó la distinción de 7 unidades hidrogeológicas, una de ellas comportándose como acuícludo y 6 acuíferos diferenciados por su naturaleza geológica, zona vadosa, conductividad hidráulica, grado de confinamiento, tipo de porosidad, y caudales promedios de extracción.

Los resultados del modelo de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS demuestran el dominio de la calificación de vulnerabilidad alta, con una distribución de 13,28 Km². La zonificación demuestra que gran parte de las litologías exponen un grado de

vulnerabilidad a la contaminación alto, muy alto hasta extremadamente alto (un área total de 17.94 Km²); resultados que fueron favorecidos por las altas puntuaciones fijadas en las variables del modelo, con la existencia de rocas calcáreas, areniscas masivas fisuradas y rocas ígneas meteorizadas comportándose como acuíferos, el predominio de suelos arenosos y areno gravosos, valores altos de recarga del sistema, condiciones de karstificación y fracturamiento de las rocas, bajas pendientes, entre otras consideraciones.

Por su parte los resultados obtenidos a través del modelo de vulnerabilidad intrínseca por el método GOD demuestran el dominio de la calificación de vulnerabilidad baja (13,98 Km²), asignada a gran parte de las litologías aflorantes que se comportan con acuíferos semiconfinados, con porosidad secundaria por fracturas. Los valores más altos de vulnerabilidad son referidos a las litologías de naturaleza calcárea, conglomerados y coluviones que se comportan como acuíferos libres.

Se concluye que el modelo SINTACS presenta resultados más coherentes en la zonificación de vulnerabilidad hidrogeológica en la localidad de Minas, pues integra en su metodología la zonificación de pesos la cual le atribuye condiciones reales de fracturamiento y karstificación a las litologías aflorantes, así como escenarios de impacto antrópico relevante, entre otros.

La clasificación hidroquímica establece que las aguas muestreadas presentan altos índices de dureza y se catalogan como aguas Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas y Bicarbonatadas sódicas, lo que sugiere que pese a que geoquímicamente son poco evolucionadas, con un tiempo de residencia corto en el sistema acuífero, han sufrido procesos de intercambio catiónico a través de la interacción existente entre agua-roca que favorece la disolución de sulfatos y el enriquecimiento del ión sodio.

La concentración de Bicarbonatos de la muestra MN-LR-04 supera los límites permisibles por la normativa de agua potable para Uruguay. Así mismo la muestra MN-LR-19 presenta concentraciones de Nitratos superiores a la norma. Los resultados de zonificación de vulnerabilidad a la contaminación por el método SINTACS indican que en estos sectores se presenta una vulnerabilidad hidrogeológica alta a muy alta, por lo que las condiciones geológicas favorecerían el transporte de cargas contaminantes que pueden alterar de manera más significativa la calidad del recurso.

10. Recomendaciones

Como recomendación para la integración de nuevos modelos de estimación de la vulnerabilidad acuífera en la localidad de Minas, o en su defecto, el mejoramiento de los resultados aquí expuestos, se propone desarrollar un estudio de suelos detallado en el área, que logre evaluar la textura y la capacidad de infiltración del terreno, características que apoyan la consolidación y verificación de capas temáticas como la recarga del sistema y el efecto de mitigación de los suelos.

Así mismo, se recomienda efectuar ensayos geofísicos como técnicas de exploración indirecta que permitan corroborar la naturaleza de la zona saturada y no saturada de los acuíferos presentes en el área en términos de su litología, espesor y anomalías por efecto de cavidades y/o fracturas generadas por procesos de karstificación y disolución de rocas carbonatadas; del mismo modo poder interpretar la conexión entre estas discontinuidades y las generadas por medio de actividad tectónica (fallas y pliegues) que consolidan acuíferos fisurados.

Se recomienda realizar un monitoreo periódico de los niveles estáticos en los pozos relevados así como prestar especial atención a la construcción de nuevas perforaciones en el área de carácter público y/o privado con sus respectivos de ensayos de bombeo con el objetivo de evaluar la variación espacio-temporal de los niveles piezométricos en los acuíferos de interés, modelar los parámetros hidráulicos y constituir un modelo hidrogeológico conceptual que se acerque a las condiciones reales el sistema acuífero de la localidad de Minas.

Los usos actuales del suelo, principalmente asignados a actividades económicas como la forestación con eucaliptos, cultivos de soja, ganadería extensiva, actividades mineras, entre otras, contribuyen a la disminución de la recarga que llega al acuífero, lo que justifica el monitoreo y control tanto de los niveles piezométricos como de la extracción de agua en los pozos existentes.

Se requiere plantear esquemas de ordenamiento territorial que favorezcan la conservación de la cobertura vegetal autóctona y el control de actividades antrópicas en las zonas catalogadas con vulnerabilidad alta a la contaminación, principalmente las asociadas a potencias de carbonatos afectadas por karstificación en superficie que aumentan el grado de sensibilidad del acuífero a verse afectado por una carga contaminante.

Finalmente, con los resultados obtenidos de calidad de agua potable en la localidad de Minas, se recomienda a propietarios de predios privados así como a los entes municipales plantear alternativas de tratamiento de aguas duras, un ejemplo de ello son los ablandadores de agua de intercambio iónico, como medida de mitigación requerida para prevenir los impactos latentes en el uso del recurso destinado a riego, daños a la red de tuberías por efectos de corrosión, entre otros.

Bibliografía

- Al Kuisi, M., El-Naqa, A., & Hammouri, N. (2006). Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environmental Geology*, 50, 651-667. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0239-8>.
- Álvarez, P. (2020). *Geología e hidrogeología de acuíferos kársticos en el Abra de la Coronilla, Departamento de Lavalleja, Uruguay* (Tesis de pregrado). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Árcega Santillán, I. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica del Acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, Mexico* (Tesis de Maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C, San Luis Potosí, México.
- Barreto, L., y Morales, P (2017). *Comparación de metodologías para el cálculo de la Evapotranspiración real, a partir de diferentes métodos de estimación como una herramienta para la toma de decisiones en la agricultura urbana, en el barrio Hierbabuena (Villavicencio, Meta)*. (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Bessonart, S., y Ciarán, E. (2009). *Evaluación del riesgo sanitario en el manejo del agua en establecimientos lecheros de Ecilda Paullier Departamento de San José* (Tesis de Doctorado). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Blanco, G., y Gaucher, C. (2005). Estratigrafía, paleontología y edad de la Formación las Ventanas (Neoproterozoico, Uruguay). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 12(2), 109-124. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=381740356004>.

Bossi, J. (2010). Evolución de la Litosfera durante el Predevónico de Uruguay: Un predominio de transurrencias. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología*, (17), 3–14.

Climate data.org. (2014). *Lavalleja Clima*. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/uruguay/lavalleja-191/>

Collazo, M. (2020). Índice de factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea (IDHAS). Caso de aplicación Uruguay. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, Edición Especial Octubre/2020-3, 56-67. <https://alhsudchile.files.wordpress.com/2018/11/alhsud-octubre-2020.pdf>.

Decreto 253 de 1979 [Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Uruguay]. Por medio del cual se aprueban normas para prevenir la Contaminación Ambiental, mediante el control de las aguas. Mayo 9 de 1979.

Decreto 315 de 1994 [Ministerio de Salud Pública del Uruguay]. Por medio del cual se aprueba el Reglamento Bromatológico Nacional. Julio 5 de 1994.

De Maio, M., Civita, M., Farina, M., & Zavatti, A. (2001). *Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/linee-guida-per-la-redazione-e-l2019uso-delle>

Demarco, P., Masquelin, H., y Sánchez, L. (2018). Historia de la Geología Precámbrica de Uruguay: Revisión de las divisiones estructurales, tectonoestatigráficas sus límites y nomenclaturas. *Revista Investigaciones DINAMIGE-MIEM*, 1(2), 1–16.

- Estrada, F., Silva, J., Ochoa, S., Moncayo, R., Cruz-Cárdenas, G., Villalpando, F., Ramos, A., y Nava, J. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del río Duero, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 235–248.
- EwTECH (2020). *El potencial de óxido-reducción y su importancia en el agua bebida*. <https://ewtech.co/el-potencial-de-oxido-reduccion-y-su-importancia-en-el-agua-de-bebida/>
- Foster, S., e Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: Una metodología basada en datos existentes.-Segunda edición*.
- Gaucher, C. (2000). Sedimentology, palaeontology, and stratigraphy of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay). *Beringeria*, 26, 3–120.
- Gaucher, C. (2014). Grupo Arroyo del Soldado. En Bossi, J., y Gaucher, C. (Eds.) *Geología del Uruguay*. Tomo 1: Predevónico. (pp. 313-339). Polo.
- Gaucher, C., Chiglino, L., & Peçoits, E. (2004). Southernmost exposures of the Arroyo del Soldado group (Vendian to Cambrian, Uruguay): Palaeogeographic implications for the amalgamation of W-Gondwana. *Gondwana Research*, 7(3), 701–714. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71057-1](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71057-1).
- Gaucher, C., Martinez, G., Cernuschi, F., Chiglino, L., Sial, A.N., y Poiré, D.G. (2008). Lito, Bio y Quimioestratigrafía del Grupo Mina Verdún: Terreno Nico Pérez, Uruguay. *V Congreso Uruguayo de Geología*. Montevideo, Uruguay.

- Gogu, R. (2000). *Advances in groundwater protection strategy using vulnerability mapping and hydrogeological GIS databases* (Tesis de doctorado). University of Liège, Belgium.
- Gomez, D. (2019). *Diagnóstico en terrenos inclinados para el desarrollo de distritos de riego, caso de estudio: Veredas de la zona Norte del municipio de Paipa*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- González, L. (2016). *Caracterización geológica e hidrogeológica de acuíferos kársticos de la formación Polanco-Ediacárico, Uruguay* (Tesis de Maestría). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Heinzen, W., Carrión, R., Massa, E., Peña, S., y Stapff, M. (2003). *Mapa hidrogeológico del Uruguay a escala 1:1'000.000*. Ministerio de Industria, Energía y Minería MIEM.
- Herrera-Oliva, C., Campos-Gaytán, J., y Carrillo-González, F. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México. *Investigación y Ciencia*, 25 (71), 34-44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67452917005>.
- Intendencia de Lavalleja (2008). *Información general del Departamento*. <http://www.lavalleja.gub.uy/web/lavalleja/143>.
- Lillo, J. (2007). *Técnicas Hidrogeoquímicas* (Tesis de Maestría). Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.
- Ministerio de Desarrollo Social MIDES (2015). *Reporte Uruguay-Primera edición*. http://observatoriosocial.mides.gub.uy/Nuevo_Test/midesv2/adjContenidos/adjcont455.pdf.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca MGAP (2020). CONEAT.

<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat>.

Montaño, J., Gagliardi, S., y Montaño, M. (2005). Recursos Hídricos Subterráneos Del Uruguay : Importancia Y Aprovechamiento Actual. *Revista Sociedad Uruguaya de Geología*, (12), 16–32.

Obras Sanitarias del Estado OSE (2006). *Norma Interna de Calidad de Agua Potable*. http://www.ose.com.uy/descargas/reclutamiento/norma_interna_de_calidad_agua_potable_de_OSE.pdf.

Padilla, T., y García., N. (2012). Hidroquímica del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21, 17-20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93225180003>

Pinheiro, R., y Taborda, C. (2014). Clasificación morfológica del relieve de uruguayo basada en modelos digitales de elevación y técnicas geomorfométricas. *Revista Digital Del Grupo de Estudios Sobre Geografía y Análisis Espacial Con Sistemas de Información Geográfica GESIG*, (6), 19–36. <https://revistageosig.wixsite.com/geosig/geosig-9-2017>.

Piper, A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transaction American Geophysical Union*, 25, 914-928.

Poiré, D. (2014). Grupo Mina Verdún. En Bossi, J., y Gaucher, C. (Eds.) *Geología del Uruguay*. Tomo 1: Predevónico. (pp. 233-251). Polo.

Poiré, D., González, P., Canalicchio, J., y García, F. (2003). Litoestratigrafía y estromatolitos de la sucesión sedimentaria precámbrica de la cantera Mina Verdún, Minas, Uruguay. *Revista*

- de La Sociedad Uruguaya de Geología. Publicación Especial N°1-II Taller Sobre la Estratigrafía del Precámbrico del Uruguay*, 108–123.
- Poiré, D., González, P., Canalicchio, J., García, F., y Canessa, N. (2005). Estratigrafía Del Grupo Mina Verdun, Proterozoico De Minas, Uruguay. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 12(2), 125–143.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=381740356005>.
- Poiré, D., y Gaucher, C. (2009). Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de la Plata Palaeocontinent: Lithostratigraphy. *Developments in Precambrian Geology*, 16, 87–101.
[https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(09\)01605-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(09)01605-3).
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., y Rossi, P. (1985). *Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000*. Dirección Nacional de Minería y Geología MIEM-DINAMIGE.
- Quiroz, O., Martinez, D., y Massone, E. (2012). Evaluación comparativa de métodos de cálculo de recarga en ambientes de llanura. La llanura Interserrana Bonaerense (Argentina) como caso de estudio. *Dyna*, (171), 239–247.
- Ribero, A. (2019). *Geología de la región centro-norte del Departamento de Canelones: Modelo geológico conceptual y su relación con la ocurrencia de aguas subterráneas* (Tesis de pregrado). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Rodriguez, J. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre del 2008. *Revista Pensamiento Actual*, 9(12), 125–134.

- Rosello, E., Veroslavsky, G., Masquelin, H., y De Santa Ana, H. (2007). El corredor Juro-Cretácico Santa Lucía-Aiguá-Merín (Uruguay): Cinemática transcurrente dextral y controles preexistentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 62(1), 92–104. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000304749756>.
- Ruiz, D., y Martinez, G. (2015). *Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos presentes en el área del municipio de Ambalema, Departamento de Tolima, Colombia* (Tesis de Especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Servicio Geográfico Militar SGM (1999). *Carta topográfica a escala 1:50.000, Hoja G-27 Fuente del Puma, Uruguay*.
- Servicio Geográfico Militar SGM (2000). *Carta topográfica a escala 1:50.000, Hoja G-26 Minas, Uruguay-Segunda edición*.
- Schosinsky, G., y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, (23), 43–55. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>.
- Spoturno, J., y Oyhantçabal, P. (2012). *Mapa Geológico del departamento de Maldonado a Escala 1:100.000, Memoria explicativa*. Ministerio de Industria, Energía y Minería MIEM y Facultad de Ciencias UDELAR, Uruguay.
- Spoturno, J., Oyhantçabal, P., y Faraone, M. (2019). *Mapa geológico del Departamento de Lavalleja a escala 1:100.000*. Ministerio de Industria, Energía y Minería MIEM y Facultad de Ciencias UDELAR, Uruguay.

- Stiff, H. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10),15. <https://doi.org/10.2118/951376-g>.
- Truque, P. (2012). *Armonización de los estándares de agua potable en las Américas*. <https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>.
- Vargas Quintero, M. (2010). *Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación*. Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial, Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/acuiferos/Propuesta-metodologica-Vulnerabilidad-Intrinseca-de-lo-Acuiferos-a-la-Contaminacion.pdf>.