
Priorización de acciones para la protección del agua subterránea en áreas urbanas. Estudio de caso: ciudad de Santa Fe, Argentina

Prioritization of Actions for Groundwater Protection in Urban Areas: Case Study of Santa Fe city, Argentina

Mariana Vera¹

Facundo Kisser¹

Mónica D'Elia¹

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral Ciudad Universitaria, Ruta Nacional 168 Km 472 – Santa Fe (CP3000) – Argentina
E mail: marianapvera@gmail.com

Riera, C.; Natenzon C.E. (2025). Los problemas ambientales de la agricultura trashumante bajo riego. Conflictos e incertidumbres por el uso del agua subterránea en el sudeste bonaerense. *Revista Estudios Ambientales*, 13 (1), 79-96.

Recibido: 30/12/24 - **Aceptado:** 18/06/25 – **Publicado:** 18/07/2025

RESUMEN

La protección del agua subterránea en entornos urbanos exige la implementación de estrategias y medidas preventivas. Esto es crucial, ya que las actividades que se realizan en el territorio, las cuales pueden ser contaminantes, coexisten con las fuentes de abastecimiento de agua subterránea. En la ciudad de Santa Fe (Argentina) se desarrollan diversas actividades económicas comerciales, agrícolas e industriales, que pueden constituir una amenaza a la calidad del agua subterránea cuando los lixiviados que ellas generan no se controlan adecuadamente, pudiendo así generar un riesgo para el medio ambiente y para la salud de sus habitantes. Este trabajo tiene por objetivo definir zonas que requieran acciones prioritarias para la protección de la calidad del agua subterránea de la ciudad de Santa Fe, como herramienta para elaborar medidas preventivas y/o correctivas en el marco de una gestión sostenible del agua. Para ello se utilizó una metodología basada en el peligro de contaminación del agua subterránea que considera el inventario de las actividades potencialmente contaminantes y su clasificación según su amenaza de contaminación al agua subterránea y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.

Se establecieron tres niveles de acción: alto, intermedio y bajo. Para cada uno, se caracterizaron las actividades potencialmente contaminantes identificadas en la ciudad. Con

base en esta clasificación, se proponen lineamientos que contribuyan a la protección de los recursos hídricos.

PALABRAS CLAVES: Contaminación, acuíferos, peligro, vulnerabilidad, gestión

ABSTRACT

Protecting groundwater in urban areas requires preventive strategies and measures, as potentially polluting human activities often coexist with groundwater supply sources. In Santa Fe city, Argentina, diverse commercial, agricultural, and industrial activities pose risks to groundwater quality, particularly when their leachates are not properly managed, thus creating potential threats to both environmental and public health. This study aims to identify priority areas for groundwater protection in Santa Fe to support the development of preventive and corrective measures within the framework of sustainable water management. The methodology integrates an inventory of potentially polluting activities for the groundwater, classifying them by their contamination risk and the aquifer's vulnerability. Three priority action levels—high, intermediate, and low—were established, and associated activities were characterized accordingly. Based on this classification, this study proposes guidelines that contribute to the protection of water resources.

KEY WORDS: pollution, aquifers, hazard, vulnerability, management

INTRODUCCIÓN

Según el informe de las Naciones Unidas (2024), aproximadamente el 70% de las extracciones de agua dulce a nivel global se destinan a la agricultura, mientras que la industria consume alrededor del 20% y los usos domésticos o municipales representan cerca del 12%.

Las aguas subterráneas aportan aproximadamente el 25% del agua utilizada para el riego y la mitad del agua dulce empleada para fines domésticos (Naciones Unidas, 2022).

Sin embargo, el aumento de la población urbana y la expansión de las ciudades están generando una creciente presión sobre los recursos hídricos, especialmente debido a la contaminación urbana. El vertido de desechos industriales, aguas residuales no tratadas y productos químicos en cuerpos de

agua contribuye significativamente a la degradación de la calidad del agua, lo que afecta tanto a la disponibilidad como a la seguridad del agua para el consumo humano y otras actividades.

El peligro de contaminación del agua subterránea es la probabilidad de que un acuífero se contamine por actividades humanas, volviéndolo inapto para el consumo y se evalúa considerando la interacción entre la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y la amenaza de las actividades en la superficie (Foster, 1987, Foster et al., 2003).

La clasificación de las actividades desarrolladas en superficie permite identificar aquellas que podrían generar una amenaza de contaminación del acuífero y su categorización resulta fundamental para establecer prioridades en relación con el manejo de estas actividades, incluyendo el

monitoreo de calidad del agua subterránea, la investigación de impactos en la salud humana y el ambiente (Hirata, 2002).

En los centros urbanos, las actividades comerciales, industriales y agrícolas desafían la protección de la calidad del agua subterránea. La falta de control puede contaminar el acuífero, afectando la salud pública y los ecosistemas. En este escenario, es esencial implementar medidas preventivas y/o correctivas basadas en fundamentos científicos y fomentar prácticas responsables. La investigación tuvo como objetivo definir zonas prioritarias para intervenir con medidas preventivas y/o correctivas que contribuyan a la protección y gestión sostenible del agua subterránea. Para ello, se plantearon como objetivos específicos: realizar un inventario detallado y una categorización de las actividades potencialmente contaminantes

(APC) presentes en la ciudad; evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación; estimar el peligro de contaminación de las aguas subterráneas; y establecer zonas que requieran acciones prioritarias para la protección de su calidad, proponiendo medidas orientadas al control del peligro de contaminación.

Características del área de estudio

La ciudad de Santa Fe, Argentina, tiene una población de aproximadamente 400.000 habitantes (INDEC, 2010) y es un polo comercial, industrial, productivo, y académico importante de la región.

Los límites de la ciudad de Santa Fe son en su mayoría naturales: al este, la Laguna Setúbal; al oeste, el río Salado; al sur, el riacho Santa Fe y su confluencia con el río Salado e islas hasta el Paraná (Figura 1).

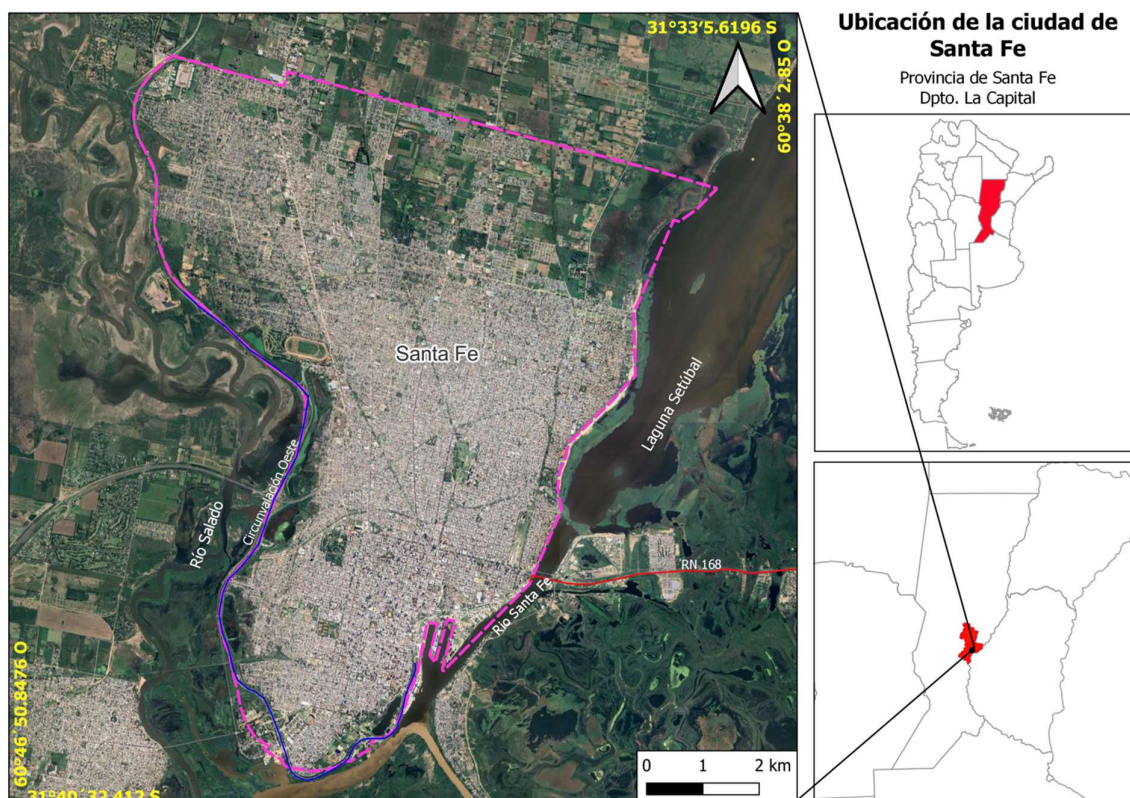


Figura 1: Ubicación de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina.

El clima en el área es templado y húmedo, con una temperatura media anual de 19 °C y una precipitación media anual de 1000 mm para el período 1901 - 2018. Particularmente, el año 2016 fue un año muy húmedo, con una precipitación anual de 1494 mm, y los años 2008 y 2018, muy secos, con precipitaciones anuales de 670 y 467 mm, respectivamente (D'Elia et al., 2021).

El acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe es de tipo multicapa. La base del acuífero en estudio está constituida por arenas grises y arcillas verdes correspondientes a la Formación Paraná. Superiamente, se encuentra una capa de arenas y arenas gravosas de origen fluvial de aproximadamente 30 m de espesor pertenecientes a la Formación Ituzaingó, sobre la que se apoyan sedimentos cuaternarios de granulometría más fina (arenas finas a limos con arcillas) de origen eólico de aproximadamente 6 m de espesor (D'Elia et al., 2011). Estudios hidrogeológicos previos realizados en el área de estudio y alrededores (SPAR, 1992), (PROINSA, 2005) indican que el acuífero alojado en la Formación Ituzaingó se comportaría como

libre. Sin embargo, considerando la heterogeneidad de los sedimentos cuaternarios que suprayacen a este acuífero que contiene proporciones importantes de arcilla, y el comportamiento de los niveles de agua subterránea en pozos de observación ubicados en la ciudad, se lo podría considerar como libre cubierto.

La ciudad de Santa Fe cuenta con una red de monitoreo de agua subterránea compuesta por 23 pozos de entre 8 y 15 m de profundidad, cuyos tramos filtrantes se encuentran en las arenas de la Formación Ituzaingó. Esta red fue implementada por la FICH-UNL en el período 2008-2010 y cuenta con mediciones sistemáticas de niveles de agua subterránea con una frecuencia mensual (con algunas interrupciones) desde agosto de 2008 hasta la actualidad. Además, se colectaron muestras de agua subterránea en los pozos de monitoreo en el momento de su construcción. Del análisis de la información obtenida, junto con información existente, se formuló el modelo conceptual del funcionamiento del sistema hídrico subterráneo en el área (Figura 2) (D'Elia et al., 2011).

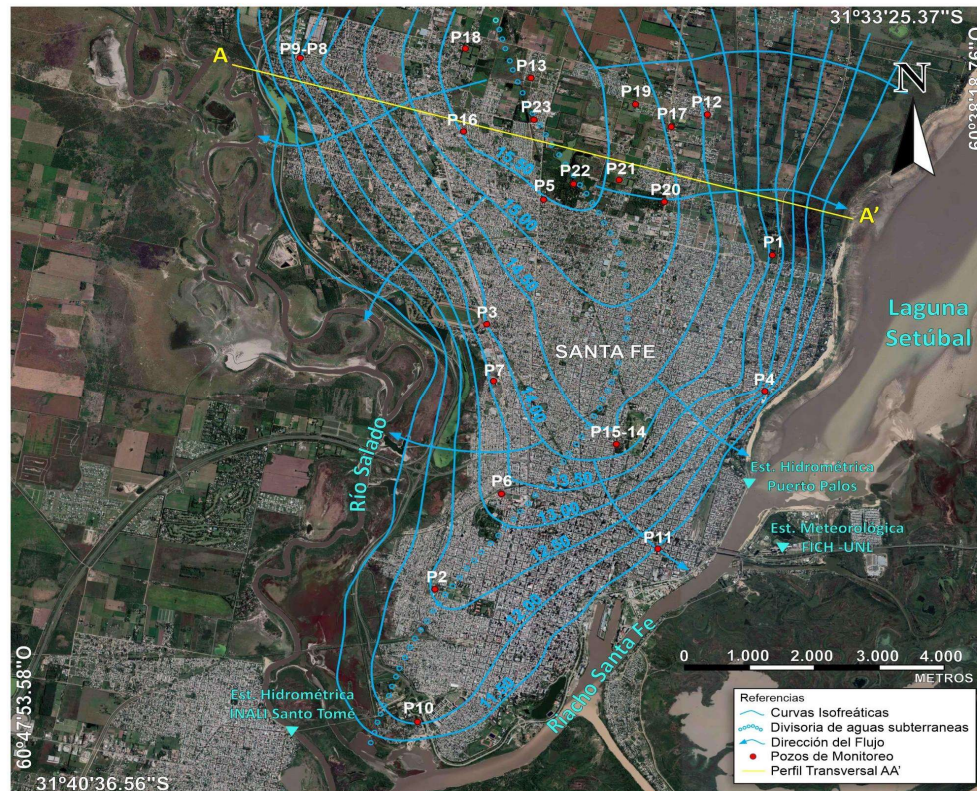


Figura 2: Curvas equipotenciales. Septiembre 2010. Fuente: Adaptado de D'Elia et al., 2011.

Se identificaron periodos de niveles freáticos altos en otoño de 2010 y de 2016, y periodos de niveles freáticos bajos en invierno de 2009 y de 2018, para el período agosto 2008 - abril 2019 (D'Elia et al., 2021).

Las curvas equipotenciales del acuífero para el año 2016 y 2018, permitieron distinguir una zona de recarga en el sector norte de la ciudad, en coincidencia con las áreas menos impermeabilizadas por la urbanización. Se identificó una divisoria de aguas subterráneas en el sector central y áreas de descarga en el sector este, oeste y sur hacia el río Salado, la laguna Setúbal y la confluencia de ambos en el riacho Santa Fe, respectivamente (D'Elia et al., 2011).

El 98% de la población de Santa Fe tiene acceso a agua potable por red, cuyo suministro proviene de dos tomas superficiales ubicadas en los ríos Colastiné y Santa Fe, ambos. Mientras que el 2%

restante obtiene agua subterránea mediante perforaciones domiciliarias y comunitarias, que captan agua del acuífero alojado en la Formación Ituzaingó. Además, solo el 73% de la población cuenta con servicio de red cloacal; el resto usa pozos negros para el saneamiento (Figura 3).

Aunque sólo el 2% del agua potable consumida en la ciudad de Santa Fe proviene de fuentes subterráneas, la protección de este recurso continúa siendo de vital importancia. En primer lugar, el agua subterránea constituye una fuente estratégica de abastecimiento en situaciones de emergencia, debido a las fallas en el sistema de captación superficial o eventos extremos, tales como sequías prolongadas o episodios de contaminación del recurso superficial. Como lo acontecido en la ciudad entre mediados de 2019 y principios de 2023, donde la ciudad atravesó una sequía

prolongada que provocó niveles históricamente bajos en el río Paraná. Esta bajante afectó el abastecimiento de agua

potable y generó dificultades en la navegación, con consecuencias significativas para la región.

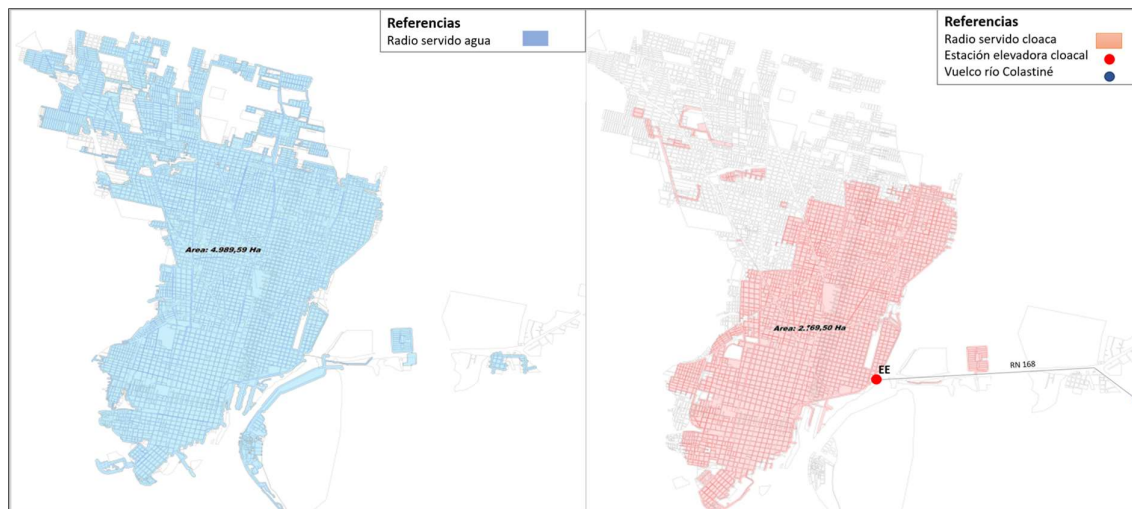


Figura 3: Servicio de red de agua y cloaca de la ciudad de Santa Fe. Fuente: Adaptado de ASSA (2022).

En segundo lugar, la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial, particularmente en zonas de llanura como la de Santa Fe, puede generar aportes desde el acuífero hacia los cuerpos superficiales o viceversa, dependiendo del gradiente hidráulico. En este contexto, la calidad del agua subterránea podría incidir en la calidad del recurso superficial captado, afectando la fuente de agua potable.

El crecimiento urbano de Santa Fe se ha extendido hacia el norte, sur-oeste y oeste, ya sea de manera planificada como a través de asentamientos informales.

En el sector norte de la ciudad, muchos asentamientos informales se han convertido en urbanizaciones formales, pero aún carecen de infraestructura básica, agua y/o cloaca. En esta zona se ubica el antiguo vertedero municipal y se realizan actividades como producción hortícola, fabricación de ladrillos y cavas.

Los efluentes urbanos se dirigen a través de una red cloacal hasta una estación elevadora en el centro-este de la ciudad, junto a la Laguna Setúbal (Figura 2). Allí se realiza un pretratamiento para separar sólidos y reducir la carga orgánica en su vuelco al río Colastiné a 10 km aproximadamente al este de la ciudad.

En el caso de la disposición final de los residuos sólidos urbanos, el antiguo relleno sanitario ubicado en el norte de la ciudad funcionó desde el año 1996 al año 2010, período en el cual se acumularon 1.100.000 toneladas de residuos, la altura del relleno alcanzó los 15 m con una profundidad de aproximadamente 2,5 m desde el nivel del terreno (Pagliano, 2016).

Desde 2010, Santa Fe utiliza el Complejo Ambiental, ubicado al noroeste de la ciudad, para la disposición de residuos sólidos urbanos. Este sitio se encuentra ubicado al oeste de la avenida Circunvalación Oeste (Figura 1) tiene una capacidad total de

1.500.000 toneladas y actualmente opera al 70% de su capacidad. A pesar de esto, aún existen microbasurales en varios puntos del área urbana.

METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos del trabajo se realizó un inventario de las APC utilizando una adaptación de la metodología propuesta por Zaporocec en Foster et al. (2003), a partir de fuentes de información disponibles para su identificación, su localización espacial y caracterización: guías telefónicas, páginas amarillas, guías industriales y comerciales, cámara de expendedores de combustibles, imágenes satelitales.

Una vez identificadas las APC se verificó su existencia y localización espacial con la utilización de la herramienta Street View de Google Maps y en ciertos casos con reconocimiento de campo.

El inventario de las APC se diseñó considerando rubro industrial, razón social, ubicación, descripción y tipo de contaminación que podría generar (Tabla 1). Luego se categorizaron según la amenaza de contaminación que estas actividades representan para el agua subterránea utilizando el Método POSH de Foster et al. (2003). Este método considera dos características: el origen del contaminante y la sobrecarga hidráulica, distinguiendo entre actividades difusas o puntuales. Con ello se establecen tres niveles cualitativos de amenaza: reducida, moderada y elevada para las categorías de APC difusas y APC puntuales (Tabla 2 y Tabla 3, respectivamente). Para la representación gráfica de los resultados se utilizó el software libre QGIS. La Tabla 4 muestra la simbología empleada para la representación cartográfica.

Tabla 1: Inventario de las APC

Id	Actividad	Razón Social	Ubicación	Descripción	Tipo de contaminación
Número Identificador	Rubro industrial	Nombre comercial	Dirección postal y/o coordenadas	Descripción de la actividad	Puntual o difusa

Tabla 2: Categorización de APC difusas según su amenaza POSH. Adaptado de Foster et al. (2003)

AMENAZA	APC DIFUSAS	
	Saneamiento in situ	Prácticas agrícolas
Elevado	Mayor al 75% y densidad poblacional superior a 100 personas/ha	Cultivos intensivos y monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego, pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas.
Moderado	Intermedio entre elevado y reducido	
Reducido	Menor al 25% y densidad poblacional inferior a 50 personas/ha	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

Tabla 3: Categorización de APC puntuales según su amenaza POSH. Adaptado de Foster et al. (2003)

AMENAZA	APC PUNTUALES			
	Disposición de residuos	Sitios industriales	Lagunas de efluentes	Urbanas
Elevado	Residuos de industrias tipo 3 ¹ , residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3, cualquier actividad que maneje >100 kg/d de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3, cualquier efluente (excepto aguas residuales) si el área >5 ha	
Moderado	Precipitación >500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo 1/ agroindustriales todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área >5 ha, otros casos que no figuran arriba o abajo	Gasolineras, rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas
Reducido	Precipitación <500 mm/a con residuos residenciales/ industriales tipo1/ agroindustrias	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial	Cementerios

Tabla 4: Representación cartográfica de las APC según su amenaza.

APC		Amenaza		
		reducida	moderada	elevada
Puntuales	Actividad industrial			
	Estaciones de Servicio			
	Disposición de residuos sólidos			
	Cementerios			
Difusas	Saneamiento in situ			
	Prácticas agrícolas			

El Parque Industrial con 20 industrias correspondientes a los tipos 1, 2 y 3, en el norte de la ciudad fue clasificado como Industria del tipo 3, considerando el escenario más crítico.

La evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, se realizó con el Método GOD (Foster et al., 2003).

¹ Industrias tipo 1: carpinterías, fábricas de alimentos y bebidas, procesamiento de minerales no metálicos. Industrias tipo 2: fábricas de caucho, fertilizantes, detergentes y jabones. Industrias tipo 3: talleres mecánicos, manufacturas de pesticidas, plásticos, productos farmacéuticos y químicos, procesamiento de metal.

Este método considera que la vulnerabilidad del acuífero depende de tres parámetros:

G: el grado de confinamiento hidráulico o sea el tipo de acuífero,

O: ocurrencia del estrato suprayacente representada por las características de litológicas de los estratos que separan al acuífero de la superficie del terreno y

D: distancia al nivel del agua subterránea

Los valores de estos parámetros varían de 0 a 1 y el producto de ellos representa un

índice, que también varía de 0 a 1, que permite clasificar la vulnerabilidad del acuífero por rangos en

vulnerabilidad extrema, alta, media, baja y despreciable, según el significado práctico que se representa en la Tabla 5.

Para cada uno de los parámetros del método se elaboró un mapa y por operatoria entre ellos, realizado en QGIS, se obtienen zonas con distintas categorías de vulnerabilidad.

Tabla 5: Categoría de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. Foster et al. (2003)

Vulnerabilidad	Significado
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Media	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Baja	Solo son vulnerables a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Teniendo en cuenta las características del acuífero libre cubierto por arenas finas a limos con arcillas, se consideró el parámetro G igual a 0,7 y el parámetro O igual a 0,55 para toda el área. El mapa de isopropundidades se elaboró como diferencia ráster entre el Modelo Digital del Terreno (MDT) y el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la superficie freática en un determinado momento.

El MDT se obtuvo a partir de la creación de la capa de puntos de cotas de toda la ciudad: "Cotas Santa Fe". Esto se realizó accediendo a información de las siguientes capas a través de Geoservicios Ráster (WMS): Capa "Cotas SCIT" del Servicio de Catastro e Información Territorial de Santa Fe (SCIT,

Capa Cotas SCIT., 2022) y Capa "Cotas" del Instituto Nacional del Agua (INA, 2022). La capa de puntos generada se exportó a una planilla de cálculo y se importó al software Surfer. A partir de estos puntos se aplicó una interpolación por Kriging utilizando un modelo de variograma lineal para generar un archivo ráster representativo de la superficie del terreno.

A partir de los mapas de curvas piezométricas presentados por Lanzaro y D'Elia (2023), se obtuvieron dos MDE: uno para el mes de marzo de 2016 (MDE-2016), correspondiente a una época de niveles altos de agua subterránea y otro para el mes de agosto de 2018 (MDE-2018)

correspondiente a una época de niveles bajos de agua subterránea. El peligro de contaminación del agua subterránea se determinó como interacción entre la categoría de amenaza de las APC y el grado de vulnerabilidad del acuífero. Para determinar las áreas que necesitarán acciones prioritarias, se empleó una matriz

de doble entrada (Figura 4), la cual considera tanto la categoría de amenaza de las APC como la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, es decir, el peligro de contaminación del acuífero.

		ZONAS DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO*		
		Baja	Media	Alta
CARGA POTENCIALMENTE CONTAMINANTE	Reducida	3	3	2
	Moderada	2	2	1
	Elevada	2	1	1

Nivel de acción		
1: alto	2: intermedio	3: bajo

* número reducido de zonas para simplificar esta presentación

Figura 4: Niveles de acción prioritarios para el control de la contaminación del agua subterránea. Adaptada de Foster et al. (2003)

Los valores: 1, 2 y 3 representan una escala de prioridad para realizar acciones en el marco de un programa de protección de calidad del agua subterránea del nivel más elevado al más bajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 6 resume los resultados del inventario de las APC, detallando la categoría

de amenaza de cada una y la simbología utilizada para su representación cartográfica. En la Figura 5 se puede observar la geolocalización de las APC y la categoría a la contaminación que representan. Los mapas MDT, MDE-2016 y MDE-2018 se presentan en las Figuras 6 y 7 respectivamente

Tabla 6: Categorización de las APC según su amenaza.

	APC	Cantidad	Descripción	Categoría de amenaza POSH	Símbol o
FUENTES DE CONTAMINACIÓN PUNTUALES	Industrias tipo 1	16	1 fábrica de jugos y alimentos 1 industria de cerveza 3 carpinterías 11 fábrica de productos minerales no metálicos: cemento, yeso, vidrio, marmolería, piedra, cerámica, ladrillos y mosaicos	Reducida	■
	Cementerios	3	1 cementerio Parque 1 cementerio Municipal 1 cementerio Israelita	Reducida	□
	Industrias tipo 2	7	3 fábricas de caucho: fabricación de cubiertas y cámaras. 1 fábrica de bolsas de polietileno y polipropileno 1 fábrica de papel: Fabrica de packaging. 2 fábricas de detergentes y jabones: productos de limpieza.	Moderada	▲
	Estaciones de servicio	36	De combustible líquido y/o GNC, algunas manejan aceite, contemplan lavadero y almacenamiento.	Moderada	△
	Industrias tipo 3	56	37 talleres mecánicos, algunos con lubricentos y gomería, de chapa y pintura 4 fábricas de envases plásticos 1 industria farmacéutica 1 fábrica de productos químicos orientados a la limpieza. 3 fábricas con procesamiento de metales: acero inoxidable, aluminio, chapa 10 metalúrgicas	Elevada	▼
	Rellenos sanitarios	2	1 antiguo relleno sanitario (clausurado) 1 relleno sanitario en funcionamiento	Elevada	▽
	Parque Industrial "Los Polígonos"	1	Con 20 empresas instaladas: fábrica de muebles, aberturas de aluminio, frigorífico, metalúrgicas, productos químicos, productos de hormigón, portones automáticos, entre otras.	Elevada	▼
FUENTES DE CONTAMI	Saneamiento in situ	28 ha (aprox.)	Abarca zonas del N, SO y O de la ciudad, donde la densidad poblacional es de aprox. 14 hab/ha.	Elevada	

	APC	Cantidad	Descripción	Categoría de amenaza POSH	Símbol o
FUENTES DE CONTAMINACIÓN PUNTUALES	Industrias tipo 1	16	1 fábrica de jugos y alimentos 1 industria de cerveza 3 carpinterías 11 fábrica de productos minerales no metálicos: cemento, yeso, vidrio, marmolería, piedra, cerámica, ladrillos y mosaicos	Reducida	■
	Cementerios	3	1 cementerio Parque 1 cementerio Municipal 1 cementerio Israelita	Reducida	□
	Industrias tipo 2	7	3 fábricas de caucho: fabricación de cubiertas y cámaras. 1 fábrica de bolsas de polietileno y polipropileno 1 fábrica de papel: Fabrica de packaging. 2 fábricas de detergentes y jabones: productos de limpieza.	Moderada	▲
	Estaciones de servicio	36	De combustible líquido y/o GNC, algunas manejan aceite, contemplan lavadero y almacenamiento.	Moderada	△
	Industrias tipo 3	56	37 talleres mecánicos, algunos con lubricentros y gomería, de chapa y pintura 4 fábricas de envases plásticos 1 industria farmacéutica 1 fábrica de productos químicos orientados a la limpieza. 3 fábricas con procesamiento de metales: acero inoxidable, aluminio, chapa 10 metalúrgicas	Elevada	▼
	Rellenos sanitarios	2	1 antiguo relleno sanitario (clausurado) 1 relleno sanitario en funcionamiento	Elevada	▽
	Parque Industrial "Los Polígonos"	1	Con 20 empresas instaladas: fábrica de muebles, aberturas de aluminio, frigorífico, metalúrgicas, productos químicos, productos de hormigón, portones automáticos, entre otras.	Elevada	▼
	Prácticas agrícolas	500 ha (aprox.)	Considerando el cordón frutihortícola en el N de la ciudad de Santa Fe	Elevada	==

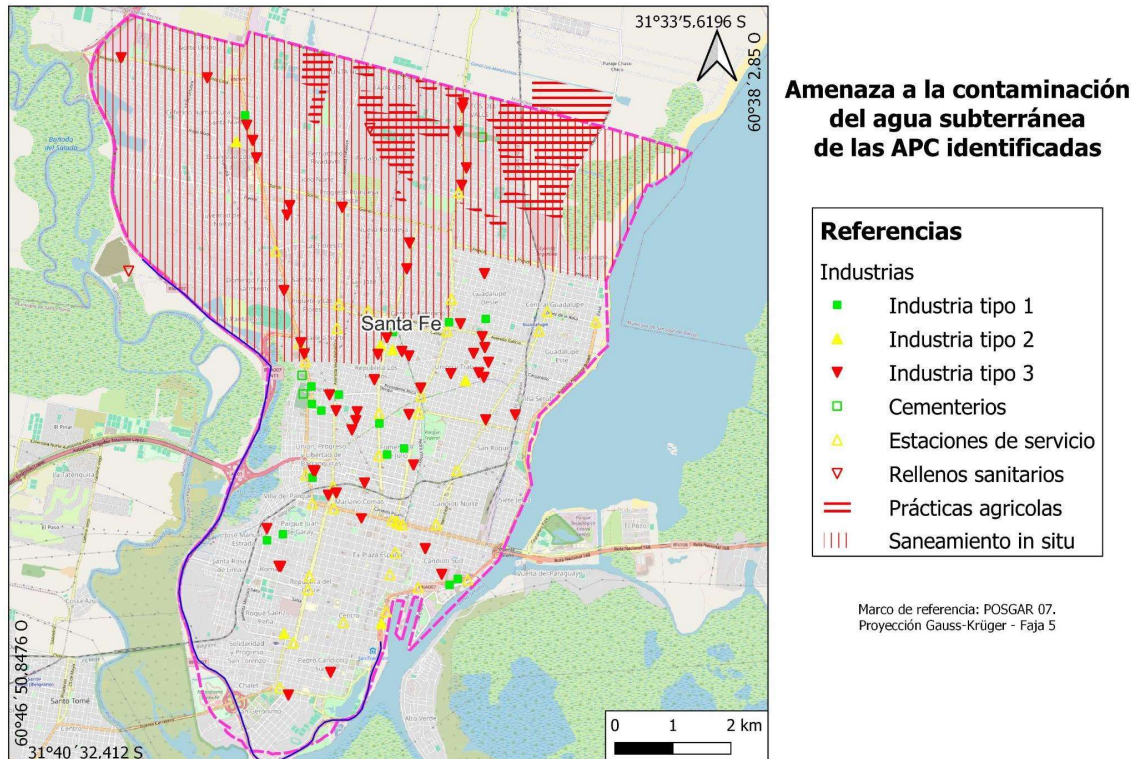


Figura 5: Amenaza a la contaminación del agua subterránea de las APC identificadas.

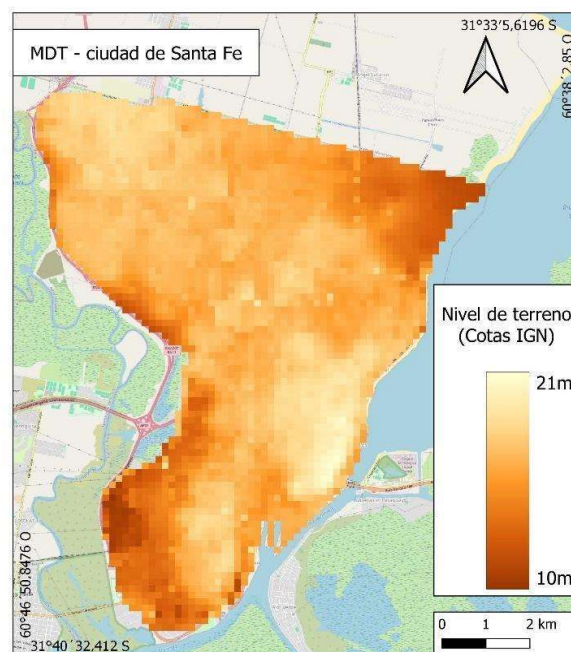


Figura 6: MDT de la ciudad de Santa Fe.

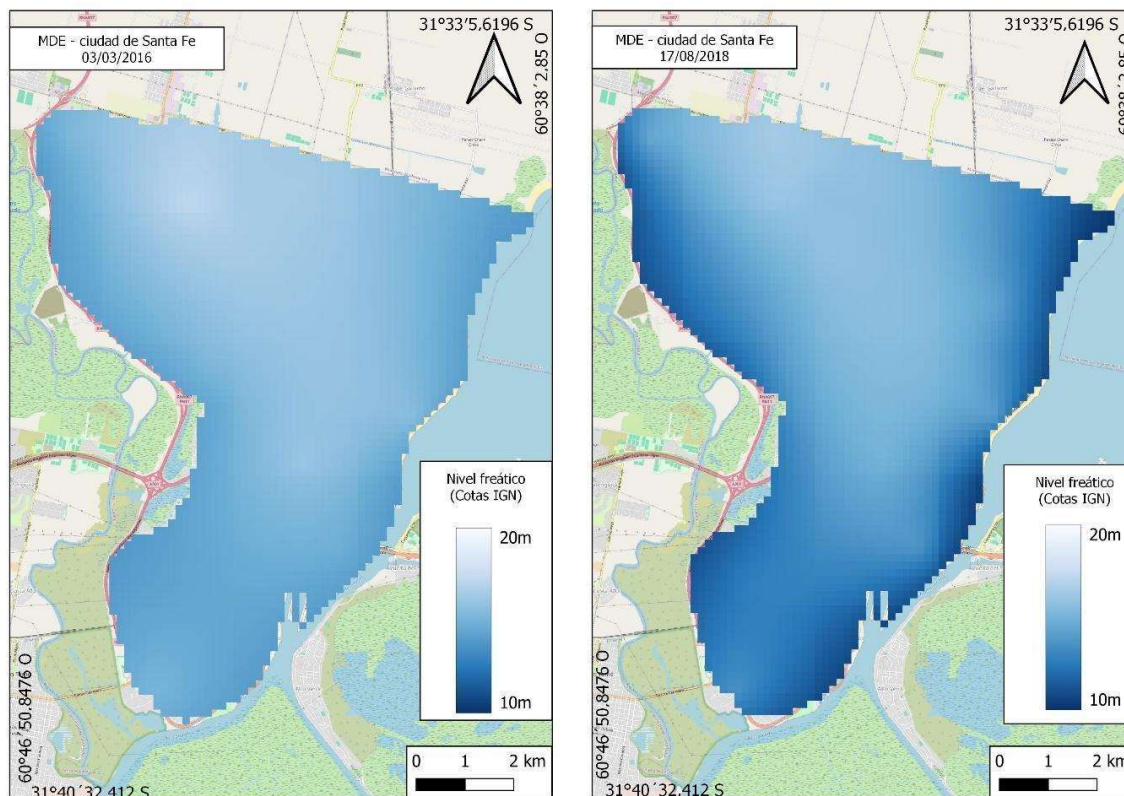


Figura 7: MDE para el año 2016 y 2018, de la ciudad de Santa Fe.

Sobre la base de las profundidades de los niveles freáticos para las dos situaciones, se adoptaron los siguientes valores para el parámetro D:

- **D₁ = 1 para profundidades** de 0 a 2 m
- **D₂ = 0,9 para profundidades** de 2 a 5 m
- **D₃ = 0,8 para profundidades** de 5 a 20 m

La vulnerabilidad obtenida a partir del producto de estos parámetros: $GxOxD_{1,2,3}$ dio como resultado los siguientes grados de vulnerabilidad:

$GxOxD_1$: Vulnerabilidad **Media**

$GxOxD_2$: Vulnerabilidad **Media**

$GxOxD_3$: Vulnerabilidad **Baja**

En la Figura 8 se puede observar que para el año 2016 la mayor parte del área posee una vulnerabilidad media y que para el año 2018 el área con vulnerabilidad media es menor.

Estos resultados ponen en evidencia que la situación más desfavorable a los efectos de evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea es el estadio de niveles freáticos más altos, correspondiente al año 2016.

En la Tabla 7 se resumen las APC registradas en el área de estudio, con su categoría de amenaza POSH y la vulnerabilidad del acuífero. El mapa de la Figura 9 es el mapa de peligro de contaminación del agua subterránea para la ciudad de Santa Fe considerando el escenario del año 2016 para el acuífero freático.

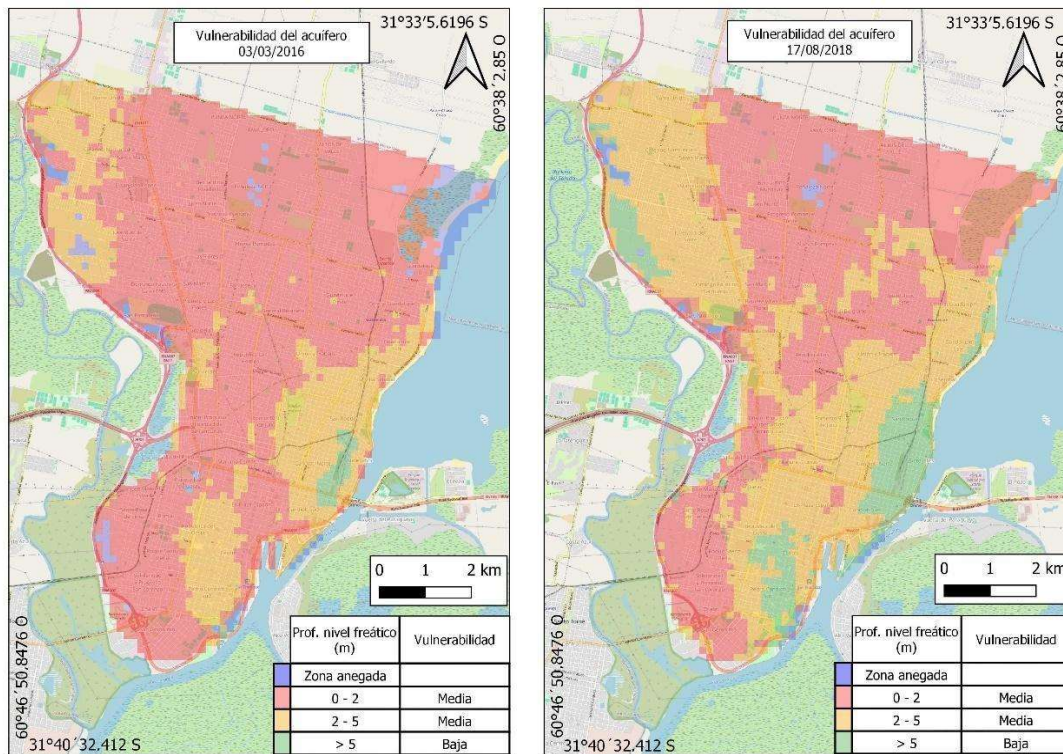


Figura 8: Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación del agua subterránea. Ciudad de Santa Fe

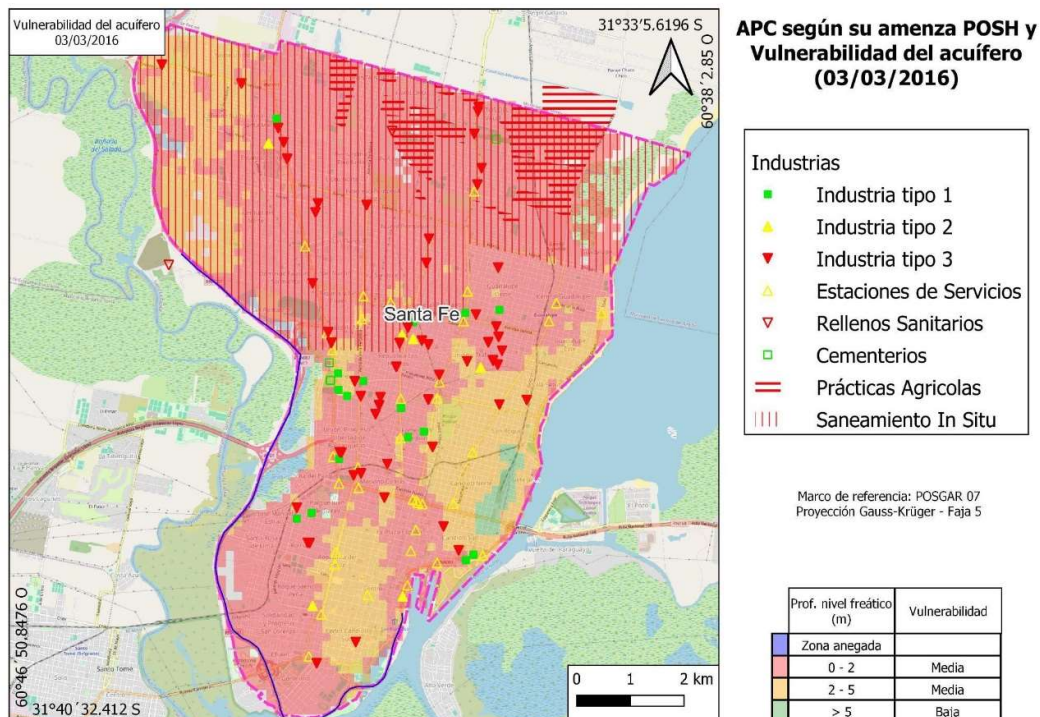


Figura 9: APC según su amenaza POSH y Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación

Tabla 7: APC, categoría de amenaza POSH, vulnerabilidad del acuífero, peligro de contaminación del agua subterránea y nivel de priorización de acciones.

APC	Categoría de amenaza POSH	Vulnerabilidad del acuífero	Peligro de contaminación del agua subterránea	Nivel de priorización de acciones
Puntuales				
Industrias Tipo 1	Reducido	Media	Moderado/Bajo	3
Cementerios	Reducido	Media	Moderado/Bajo	3
Industrias Tipo 2	Moderado	Media	Alto/Moderado	2
Estaciones de Servicio	Moderado	Media	Alto/Moderado	2
Industrias Tipo 3	Elevado	Media	Alto/Extremo	1
Parque industrial	Elevado	Media	Alto/Extremo	1
Disposición de residuos sólidos	Elevado	Media	Alto/Extremo	1
Difusas				
Saneamiento in situ	Elevado	Media	Alto/Extremo	1
Prácticas agrícolas	Elevado	Media	Alto/Extremo	1

Como resultado de este análisis se diferencian los siguientes niveles de priorización:

- De **tipo 3 (nivel de priorización bajo)**: para las industrias de tipo 1 y cementerios.
- De **tipo 2 (nivel de priorización intermedio)** para las industrias del tipo 2 y estaciones de servicio.
- De **tipo 1 (nivel de priorización alto)** para las industrias de tipo 3, Parque industrial, disposición de residuos urbanos, saneamiento in situ y prácticas agrícolas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se considera que la metodología aplicada fue efectiva y fácil de implementar, ya que se basó en el uso de fuentes accesibles y software de libre acceso, lo que facilitó su ejecución sin la necesidad de grandes recursos. Esta aproximación no solo permitió una implementación ágil, sino que también resultó ser una herramienta útil para el monitoreo continuo. Además, la metodología

propuesta ofrece la ventaja de mantener el inventario de APC actualizado de manera constante, lo cual es crucial para la evaluación y protección del agua subterránea en áreas urbanas.

Este trabajo es útil para instituciones encargadas de la gestión de recursos hídricos y la protección ambiental. A Aguas Santafesinas S.A. (ASSA) le proporcionará herramientas para controlar el uso del agua y establecer programas de monitoreo. A la Municipalidad de Santa Fe (MCSF), le ayudará en la formulación de políticas ambientales y el ordenamiento territorial. Además, las autoridades locales y empresas de servicios podrán coordinar acciones para proteger la calidad del agua subterránea, como auditorías ambientales y monitoreo constante. A continuación, se presentan algunas recomendaciones específicas a considerar:

- Dado el impacto de algunas actividades sobre la calidad del agua subterránea, es crucial **priorizar las acciones de nivel 1**.

Se recomienda expandir la red de desagües cloacales en la zona norte de la ciudad o, alternativamente, instalar plantas de tratamiento compactas en cada barrio para soluciones más eficientes. Se recomienda identificar a los pequeños productores del cordón frutihortícola de Santa Fe, elaborar un inventario de cultivos y evaluar el uso de fertilizantes, pesticidas o prácticas agroecológicas. Además, es necesario capacitar a los productores en buenas prácticas agrícolas para promover técnicas más sostenibles. En cuanto a los residuos sólidos urbanos, se sugiere realizar estudios hidrogeológicos sobre el impacto de lixiviados en los rellenos sanitarios y establecer un monitoreo continuo de la calidad del agua subterránea. También es importante crear un inventario de microbasurales y desarrollar estrategias para su erradicación. En cuanto al parque industrial, se recomienda supervisar el cumplimiento del sistema de monitoreo ambiental establecido en el Estudio de Impacto Ambiental aprobado durante su instalación, con el objetivo de garantizar que las actividades industriales no perjudiquen la calidad del agua subterránea. Debido a la naturaleza informal y fluctuante de actividades como los talleres mecánicos y de chapa y pintura, es esencial implementar estrategias de acompañamiento, esto incluye identificar las sustancias peligrosas, establecer protocolos de manejo seguro y garantizar la correcta disposición de los residuos. Además, es crucial capacitar a los trabajadores en el cumplimiento de normativas para reducir los riesgos para la salud y el medio ambiente, promoviendo un entorno laboral más seguro y responsable.

- Para las **actividades clasificadas con nivel de priorización 2 y 3**, se recomienda implementar un control más riguroso sobre las sustancias utilizadas y su almacenamiento. Es esencial contar

con un inventario detallado de estas actividades, que incluya información sobre sus sistemas de tratamiento, así como los volúmenes de efluentes generados y tratados. Además, es crucial asegurar una gestión adecuada de la disposición final de los residuos, como bolsas y empaques. En el caso de las estaciones de servicio, uno de los puntos más sensibles es el control de posibles fugas de los tanques subterráneos, y es igualmente importante considerar el pasivo ambiental cuando estas estaciones cesen su funcionamiento.

Por último, en los cementerios ubicados en la zona Oeste de la ciudad de Santa Fe, que están expuestos a riesgos de inundaciones, se recomienda mejorar tanto la impermeabilización como el drenaje superficial para reducir los riesgos de contaminación microbiológica. A largo plazo, podría evaluarse la posibilidad de reemplazar estos cementerios por crematorios o nichos, como una medida preventiva para mitigar los impactos ambientales.

Es crucial mantener actualizado el inventario de APC, utilizando un sistema de monitoreo continuo para adaptarse rápidamente a cambios económicos que puedan generar nuevas fuentes de contaminación o desactivar actividades de riesgo. Un inventario actualizado facilita la planificación de acciones preventivas y correctivas, protegiendo la salud pública y el medio ambiente. Además, los mapas de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea son herramientas clave para identificar áreas de alto riesgo, apoyar políticas ambientales y mejorar la respuesta ante emergencias, fortaleciendo la protección del agua y reduciendo impactos negativos. La protección del agua subterránea exige una combinación de regulaciones efectivas, planificación estratégica y una sólida educación ambiental. Estas acciones serán fundamentales para salvaguardar la salud pública y asegurar un suministro de agua sostenible a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- ASSA. (2022). *Aguas Santafesinas de la Provincia de Santa Fe*. Recuperado el 04 de marzo de 2022, de Mapa de cobertura de servicios de agua y cloaca: <https://www.aguassantafesinas.com.ar/portal/quienes-somos/santa-fe/>
- D'Elia, M., Paris, M., Tujchneider, O., Pérez, M., Pagliano, M., Gualini, S., & Fedele, A. (2011). Agua subterránea en áreas urbanas. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea* (págs. 46 - 53). Salta, Argentina: Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos - AIH.
- D'Elia, M., Paris, M., & Pérez, M. (2021). Las aguas subterráneas en el tramo medio del río. En C. Paoli, & M. Schreider, *El Río Paraná en su tramo medio: nuevas temáticas y enfoques para el desarrollo sostenible de un gran río de llanura*. (Vol. 3, págs. 89 - 142). Santa Fe, Argentina: Ediciones UNL. Recuperado el 22 de febrero de 2022, de <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/6278>
- Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Noordwijk, The Netherlands.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2003). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, DC, USA: Grupo del Banco Mundial. Recuperado el 10 de enero de 2022, de <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/229001468205159997/proteccion-de-la-calidad-del-agua-subterranea-guia-para-empresas-de-agua-autoridades-municipales-y-agencias-ambientales>
- Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* (2), 81-90. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/hg.v2i0.2624>
- INDEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censos República Argentina*. Obtenido de <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-18-77#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20nacional%20est%C3%A1%20compuesta,mujeres%20hay%2094%2C8%20varones>.
- Lanzaro, M. V., & D'Elia, M. (2021). Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina. *Revista de Geología aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* (46), 25 - 41. Recuperado el 01 de abril de 2022, de <https://www.editoresasagai.org.ar/ojs/index.php/rgaia/article/view/197>
- Pagliano, M. L. (2016). *Evaluación de las relaciones hidráulicas e hidroquímicas entre un relleno sanitario y un sistema acuífero en un área de llanura*. Tesis de la Maestría de Ingeniería en los Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- PROINSA. (2005). *Proyectos de Ingeniería S. A. Estudio Hidrogeológico Parque del Sur. Ciudad de Santa Fe. Provincia de Santa Fe*. Informe Técnico, Santa Fe.
- SPAR. (1992). *Servicio Provincial de Agua potable Rural. Dirección de Obras Sanitarias. Ministerio de Obras, Servicios Públicos y Vivienda. Estudio de Fuente. Localidad de Monte vera*. Informe Técnico.
- UNESCO. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022. Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible*. Francia: ONU. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>
- UNESCO. (2024). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024. Agua para la prosperidad y la paz*. Francia: ONU. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195>