



# Agua subterránea y construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, provincia de Santa Fe, Argentina

## Groundwater and underground construction in urban areas. The case of the city of Santa Fe, province of Santa Fe, Argentina

Lanzaro, María Verónica <sup>1</sup> ✉ - D'Elia, Mónica Patricia <sup>2</sup>

Recibido: 05 de diciembre de 2020 • Aceptado: 25 de marzo de 2021

### Resumen

*En las últimas décadas, la ausencia o aplicación inadecuada de planes de ordenamiento urbano ha generado en muchas ciudades patrones de uso del suelo caracterizados por una alta concentración en áreas centrales, en contraposición con una ocupación desordenada en las periferias. A su vez, el aprovechamiento subterráneo se ha convertido en alternativa para ciudades con problemas de crecimiento y densidad poblacional, aunque generalmente, no se comprende la compleja interacción entre el uso del suelo urbano y el comportamiento del sistema hídrico subterráneo ni se aborda considerando aspectos normativos.*

*El objetivo de este trabajo es evaluar la relación entre las características hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe y las construcciones subterráneas y de esa manera contribuir con la formulación de lineamientos técnicos y normativos para optimizar proyectos de obras con aprovechamiento del espacio subterráneo.*

*Se analizaron las variaciones de niveles freáticos para un periodo de 10 años, la calidad química del agua subterránea y los usos del suelo con aprovechamiento subterráneo, constatando que la profundidad del nivel freático varió entre 1,70 m desde el terreno hasta aproximadamente 8m, rango donde se alojan fundaciones, infraestructura y recintos subterráneos.*

*Estos resultados contribuirán a optimizar futuras obras subterráneas y a la generación de una conciencia de gestión integral que asuma la relación compleja entre el uso del suelo urbano y el medio hidrogeológico en la toma de decisiones y planificación de la ciudad.*

**Palabras clave:** aguas subterráneas, áreas urbanas, uso del suelo, obras subterráneas, planificación urbana.

1. Dirección Provincial de Arquitectura e Ingeniería. Ministerio de Infraestructura, Servicios Públicos y Hábitat (M.I.S.P. y H.), Gobierno de la Provincia de Santa Fe, Francisco Miguenz 180, Piso 3, Corporate Tower, Dique 1, Puerto de Santa Fe. (3000) Santa Fe, Argentina.

✉ mlanzaro@santafe.gov.ar

2. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Ciudad Universitaria, Paraje "El Pozo", Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe, Argentina.

## Abstract

*In recent decades, the absence or inadequate application of urban planning plans has generated in many cities land use patterns characterized by a high concentration in central areas, in contrast to a disorderly occupation the peripheries. In turn, underground use has become an alternative for cities with problems of growth and population density, although the complex interaction between land use and the behavior of the groundwater system is not understood, nor is it addressed considering regulatory aspects.*

*The objective of this work is to evaluate the relationship between the hydrodynamic and hydrochemical characteristics of the aquifer system that underlies the city of Santa Fe with the underground constructions and thus contribute to the formulation of technical and regulatory guidelines to optimize works projects with underground use.*

*The variations of groundwater levels for a period of 10 years, the chemical quality of the groundwater and the underground use were analyzed, verifying that the depth of the groundwater table varied between 1.70m from the ground to approximately 8m, a range where foundations, infrastructure and underground enclosures are housed.*

*These results will contribute to optimizing future underground works and to the generation of an integral management awareness that assumes the complex relationship between the use of urban land and the hydrogeological environment in decision-making and city planning.*

**Keywords:** *groundwater, urban areas, land use, underground constructions, urban planning.*

## INTRODUCCIÓN

A medida que se consolida el desarrollo urbano se reduce el espacio disponible para concretar nuevas intervenciones en obras de distinta escala, tanto de arquitectura como de ingeniería civil. Como consecuencia de esta escasez de espacio se incrementa el costo de la tierra y la búsqueda de rentabilidad obliga a un desarrollo edilicio vertical ascendente y descendente. De este modo, el aprovechamiento del espacio subterráneo se convierte en una alternativa para muchas ciudades que poseen problemas relacionados con su crecimiento, densidad poblacional y ordenamiento urbano (*Lincoln Institute of Land Policy, 2007*).

El aumento de las superficies construidas y la densificación del uso del suelo asociado al fenómeno de urbanización implican una reducción de los espacios verdes y una impermeabilización del suelo y, consecuentemente, una disminución de la infiltración del agua en el suelo y un aumento del escurrimiento superficial. Esto incrementa la vulnerabilidad del área urbana ante inundaciones por excedentes pluviales (*Ambrosino et al., 2004*). Simultáneamente, la infraestructura básica (redes subterráneas: pluvial, cloacal, de agua potable, canales entubados) no acompaña el ritmo del crecimiento urbano evidenciándose procesos de obsolescencia y colapso.

Frente a esta realidad cobra importancia la planificación urbana como herramienta preventiva de gestión ambiental, la cual a través de instrumentos específicos como la regulación del uso del suelo y bajo los principios de desarrollo sustentable, contribuye a mejorar la seguridad de las ciudades al poner restricciones a las construcciones potencialmente peligrosas y minimizar los peligros de contaminación y riesgos ambientales (*Gómez Orea, 2008*).

En la etapa constructiva de toda obra se da una sinergia de efectos e impactos ambientales negativos como la contaminación sonora, atmosférica, del suelo y subsuelo, la degradación de espacios verdes, etc. Particularmente las construcciones subterráneas pueden crear un obstáculo al flujo del agua subterránea y alterar la calidad natural de la misma (*Custodio & Llamas, 1983; Dávila Porcel & de León Gómez, 2011; Lerner, 1997*).

Por otra parte, las construcciones subterráneas poseen una complejidad técnico-constructiva, relacionada principalmente con las excavaciones y su cimentación profunda. En todos los casos, cuando se ejecuta una excavación cercana o por debajo del nivel freático existe riesgo de inundación, filtración de agua e inestabilidad para la obra y el entorno inmediato (*Foster et al., 1998; Vázquez-Suñé et al., 2005*). Esta interacción del agua subterránea y la construcción subterránea es importante no solo durante el proceso constructivo sino también una vez finalizada la misma y a lo largo de toda su vida útil (*Custodio, 2004; Shanahan, 2009*).

Especialmente, las construcciones subterráneas son complejas y requieren parámetros elevados de calidad e ingeniería (medidas adecuadas de gestión, tecnología, métodos de construcción, técnicas de excavación, capacitación y especialización del personal de obra, etc.) en todas sus fases (idea, proyecto, ejecución, puesta en servicio). Parámetros elevados no sólo referidos a su propia materialidad, sino incluso a la necesidad de no alterar el espacio superficial y subsuperficial de las áreas urbanas, y a la protección de linderos durante el proceso constructivo (*Suárez-Burgoa, 2009*).

Actualmente es posible acceder a los conocimientos técnicos y tecnología apropiada para afrontar los impactos ambientales y sociales negativos producidos por la ejecución de obras subterráneas. Sin embargo, no son acompañados por un abordaje de los aspectos legales y normativos, lo cual requiere la comprensión de la interacción entre el uso del suelo y el comportamiento del sistema hídrico subterráneo en áreas urbanas.

La ciudad de Santa Fe no está exenta a que sucedan las situaciones antes mencionadas, más aun considerando su emplazamiento entre los ríos Salado y Paraná y la influencia de sus crecidas y de fenómenos meteorológicos extremos que se vienen registrando en los últimos años, caracterizados por abundantes precipitaciones en cortos periodos de tiempo, que hacen imprescindible integrar el funcionamiento del sistema hídrico a la planificación y construcción de la ciudad.

Por otra parte, desde el punto de vista físico-espacial, la ciudad se va acercando a un punto de saturación en las áreas más consolidadas del perímetro urbano, donde los espacios disponibles y las condiciones del mercado inmobiliario van agotando las posibilidades efectivas de ocupación de áreas vacantes o sustitución de edificaciones antiguas para ejecutar nuevas obras. Esta tendencia permite inferir que en los próximos años seguirá aumentando la ocupación urbana de mayor densidad, con mayor aprovechamiento del espacio subterráneo.

En este contexto de constante crecimiento urbano, los suelos sobre los que se asienta la ciudad también sufren alteraciones. A simple vista, solo se observan transformaciones sobre la superficie: nuevas calles pavimentadas, crecimiento del tránsito vehicular, extensión de redes de infraestructura, nuevos edificios en altura, transformaciones que también impactan en las capas de suelo por debajo de los pavimentos. Existen en la ciudad numerosos casos informados de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales y de roturas de redes subterráneas. Especialistas en geología e ingeniería ambiental definen a la situación como un fenómeno multicausal derivado del tipo de cañerías y su estado de mantenimiento, del tipo de suelo de la ciudad, del avance de la urbanización, y de la incidencia del comportamiento fluctuante y dinámico del agua subterránea (Casarotto, 2015).

Se registran también numerosas obras subterráneas, que presentan problemas de filtraciones de aguas subterráneas en su interior. En algunos casos con ingreso estacional del agua y en otros de manera permanente. Esta situación provoca la degradación de sus estructuras resistentes, asentamientos diferenciales del terreno, grietas, riesgo eléctrico, etc., que llevan a la inutilización de esos recintos, y pueden llegar a producir la inestabilidad estructural de las edificaciones. En la mayoría de los casos las patologías mencionadas son irreversibles o solo se logran soluciones parciales, difíciles de ejecutar y de muy alto costo para sus propietarios.

En los procesos de ejecución de las obras en la ciudad se evidencia un desconocimiento y falta de información acerca del comportamiento dinámico y fluctuante del agua subterránea en el tiempo y su relación con el medio construido. Previamente a la construcción de edificaciones no se considera en los proyectos las variaciones de los niveles freáticos en el terreno, lo cual evitaría problemas futuros en fundaciones y en distintos tipos de construcciones subterráneas; y estaría contribuyendo a una planificación urbana segura y económicamente racional.

En esta perspectiva y ante la falta de consideración del medio hidrogeológico y su interacción con el medio urbano, la ciudad de Santa Fe requiere proyectar un escenario futuro donde se garantice el aprovechamiento óptimo del espacio urbano, con especial consideración del espacio subterráneo bajo condiciones de seguridad técnica, ambiental y legal.

El *objetivo de este trabajo* es evaluar la relación entre las características hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe con las construcciones subterráneas y de esa manera contribuir con la formulación de lineamientos técnicos y normativos para optimizar proyectos de obras con aprovechamiento del espacio subterráneo.

## ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Provincia de Santa Fe, Argentina, es capital de la provincia y cabecera del departamento La Capital. Está ubicada en el centro-este de la República

Argentina, en la región geográfica denominada llanura pampeana a los 31° 42' de latitud sur y 60° 46' de longitud oeste, a una altitud promedio de 17 m.s.n.m.

La jurisdicción territorial del Municipio de Santa Fe, abarca 268km<sup>2</sup>, de los cuales, más de un 70% está conformado por ríos, lagunas y bañados.

El área de estudio se centra específicamente en el área urbana de la ciudad de Santa Fe; abarca 80,4km<sup>2</sup>, delimitada al norte por calle Padre Facundo Quiroga en el límite del ejido municipal, al este por la laguna Setúbal, al oeste por el río Salado y al sur por el río Santa Fe (Figura 1).

## Características generales

La ciudad de Santa Fe se localiza en el punto exacto de cruce entre la Hidrovía Paraná-Paraguay, con orientación norte-sur vinculando a Paraguay y el centro-este de Brasil con la provincia de Buenos Aires; y el Corredor Bioceánico Central, eje vial este-oeste de escala continental vinculando el sur de Brasil con la zona central de Chile. Conectada a redes de intercambios económicos activos le confieren un elevado alcance regional. La estructura económica de la ciudad se concentra fundamentalmente en el sector terciario o de servicios, prevaleciendo el comercio como principal motor de la economía. La transformación de los recursos naturales en productos primarios no elaborados, incluye a la agricultura y a la ganadería como principales actividades. La industria y la construcción conforman el sector secundario; siendo la construcción uno de los principales motores que dinamiza el conjunto de la economía. Como capital político-administrativa de la provincia posee un fuerte desarrollo del sector público en todos sus niveles.

Según el último censo del año 2010, la ciudad de Santa Fe tenía una población urbana de 391.231 habitantes (INDEC - IPEC, 2010), y la proyección poblacional estimada a julio de 2016 fue de 417.224 habitantes. Para el Aglomerado urbano Gran Santa Fe, ese censo registró una población de 501.166 habitantes, de la cual el 80% vive en la ciudad de Santa Fe.

En cuanto a la cobertura de servicios, del total de hogares particulares ocupados de la ciudad (124.927) el 95% cuenta con servicio de agua potable, el 62% con servicio de cloacas, el 64% con servicio de gas natural y el 99% con electricidad (Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, 2016).

El tamaño, la demografía y su dinamismo regional le confieren a la ciudad de Santa Fe la condición de ciudad intermedia.

## Características naturales

Según estudios previos, el clima de la ciudad es templado y húmedo, la temperatura media anual es del orden de los 19°C (período 1920-2007). La precipitación media anual es de 1007mm (período 1901-2007), con un valor máximo observado de 1825mm en el año 1914 y un mínimo de 480mm en el año 1910. Las máximas precipitaciones medias mensuales se registraron desde noviembre a abril superando los 100mm. Los meses de invierno son los menos lluviosos con montos del orden de los 30mm en promedio. El balance hídrico modular (período 1977-2007) indica que no se producirían déficits hídricos y que los excesos tendrían lugar desde abril a agosto y de octubre a diciembre, variando desde unos pocos mm hasta aproximadamente 40mm mensuales. Para el mismo período la humedad relativa media varía entre 71% y 83% y la presión atmosférica oscila entre 1006 y 1016 hPa. Se evidencia en la región un aumento

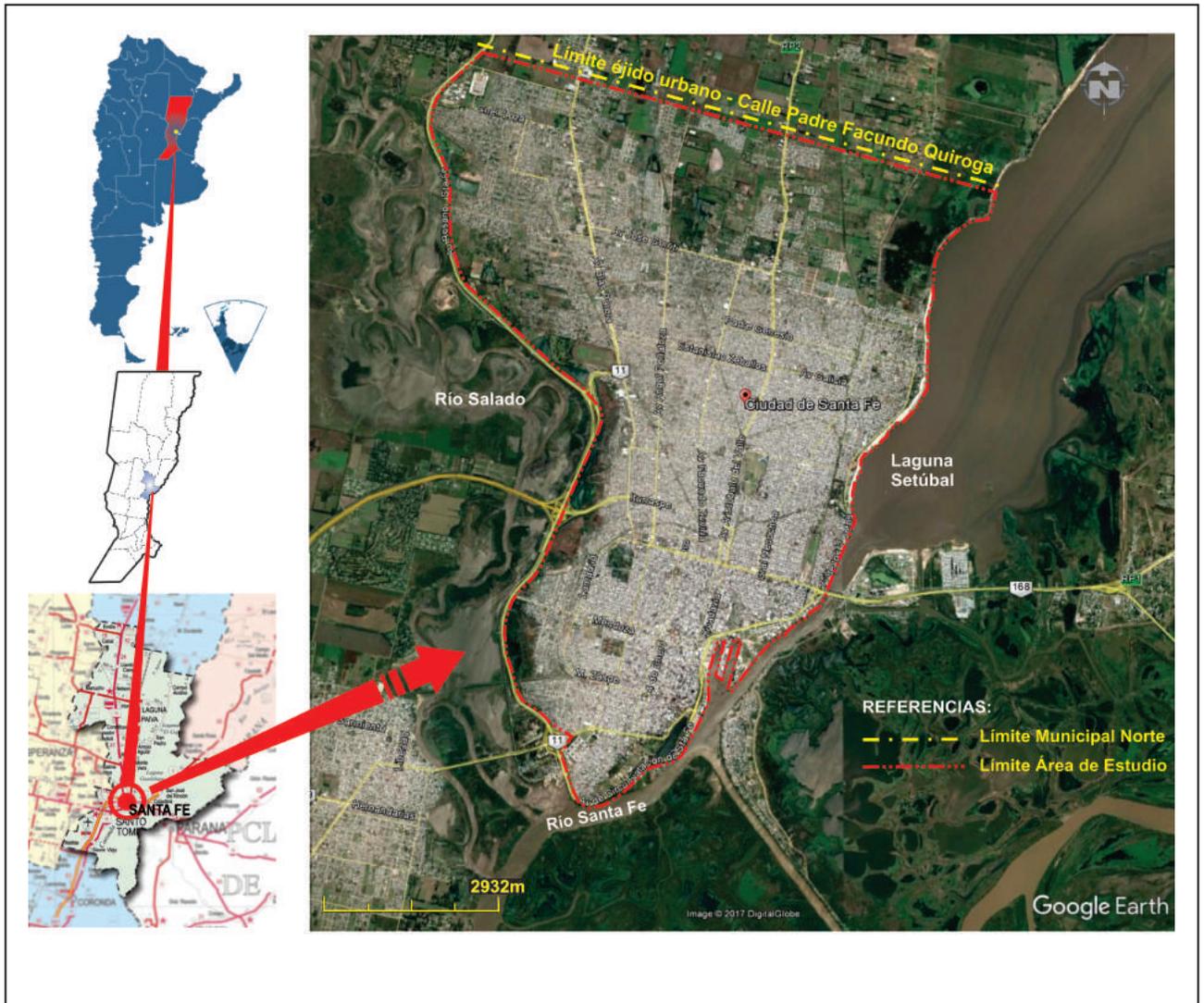


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

de la precipitación a partir de la década del '70 y hasta la actualidad, con precipitaciones anuales del orden de 900 a 1200mm, con persistencia de condiciones húmedas, eventos lluviosos muy intensos y arealmente concentrados (Pagliano, 2008).

La ciudad de Santa Fe se encuentra emplazada entre los valles de inundación de los ríos Paraná y Salado. Las máximas crecidas históricas del río Paraná se registraron durante los años 1977, 1983, 1987 y para el río Salado en 1973. Durante el año 2003, la ciudad se vio afectada por una crecida extraordinaria del río Salado que causó pérdidas humanas, más de 130.000 evacuados y cuantiosas pérdidas materiales. Esta crecida se originó por la ocurrencia de precipitaciones intensas sobre la cuenca baja del río, que ya se encontraba saturada por precipitaciones ocurridas en los meses previos. Otra situación de características extremas aconteció en marzo-abril de 2007, cuando precipitaron aproximadamente 536mm en el mes de marzo, causando el anegamiento de gran parte de la ciudad, más de 28.000 evacuados, riesgos en la salud de la población, pérdidas económicas, etc., debido al colapso de la infraestructura para la evacuación de efluentes pluviales fuera del cinturón que conforman las obras de defensa contra inundaciones (D'Elia et al., 2008).

Los puntos topográficos más altos de la ciudad se encuentran en cotas IGN (Instituto Geográfico Nacional) 20m, mientras que las máximas crecidas registradas de los ríos Paraná y Salado han estado en cotas IGN del orden de 16 a 17m, según las zonas y considerando las pendientes hidráulicas de los planos de inundación. Una gran superficie de ocupación urbana se encuentra por debajo de estas cotas de inundaciones máximas históricas y una superficie mayor aún por debajo de las cotas de inundación correspondientes a crecidas hipotéticas de mayor recurrencia. La progresiva expansión urbana fue ocupando los valles de inundación del río Paraná hacia el este y del río Salado hacia el oeste (Paoli citado por Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, 2009). Ese crecimiento urbano avanzando sobre terrenos inundables, con el tiempo ha llevado a la construcción de un complejo sistema de protección contra inundaciones conformado con terraplenes de protección, reservorios y componentes del drenaje urbano, lo que implicó el relleno de zonas bajas y modificó significativamente el drenaje natural (Gobierno de la Ciudad de Santa Fe, 2016). Resultado de esa ocupación del suelo urbano, la ciudad Santa Fe se ha transformado en un territorio vulnerable, expuesto principalmente a riesgos hídricos como las crecidas de los ríos, las lluvias intensas o la combinación de ambos fenómenos.

Las características del sistema hídrico subterráneo en la ciudad de Santa Fe se conocen a través de estudios llevados a cabo por el Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (GIG) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL).

Este Grupo ha implementado una red de monitoreo compuesta por 23 pozos de entre 5 y 15m de profundidad, cuya ubicación se muestra en la Figura 2.

Sobre la base del análisis de los perfiles litológicos de las perforaciones de los pozos de monitoreo y de perforaciones existentes, el GIG elaboró el perfil A-A' (Figura 3), en el que se puede distinguir arenas grises y arcillas verdes de la Formación Paraná a aproximadamente a partir de la cota IGN -20,5 en el norte de la ciudad y a cota IGN -32,5 en el sur de la ciudad. Esto constituye la base del acuífero en estudio. Superiormente, se encuentran arenas y arenas gravosas de 30m de espesor promedio, cuyo techo se ubica entre cotas 13 y 10 IGN, que corresponden a un ambiente dominado por la dinámica de divagación lateral de cauces del río Paraná, con episodios de

crecidas de gran intensidad que formaron estos niveles de arenas gravosas que pertenecen a la Formación Ituzaingó (conocida como Arenas "Puelches"). Sobre ellas y hasta la superficie, se apoyan sedimentos cuaternarios de granulometría más fina (arenas finas a limos, con arcillas) de origen eólico, de aproximadamente 6m de espesor promedio. Esta secuencia sedimentaria da lugar a un acuífero multicapa que estaría comportándose como libre con drenaje diferido (D'Elia et al., 2011).

Desde la implementación de la red de monitoreo en los años 2008-2009 y hasta la actualidad, se registra la profundidad del agua subterránea en los pozos con una frecuencia mensual y, en uno de ellos diariamente mediante un registrador continuo.

A través del análisis de los datos colectados e información generada se evidenció un comportamiento similar en las fluctuaciones de los niveles de agua subterránea en todos los pozos de monitoreo durante el período 08/2008-05/2011. La profundidad del agua subterránea varió desde unos pocos cm hasta 7m aproximadamente. En el período 10/2009-03/2010 se evidenció un ascenso en los niveles freáticos de 2m en promedio,

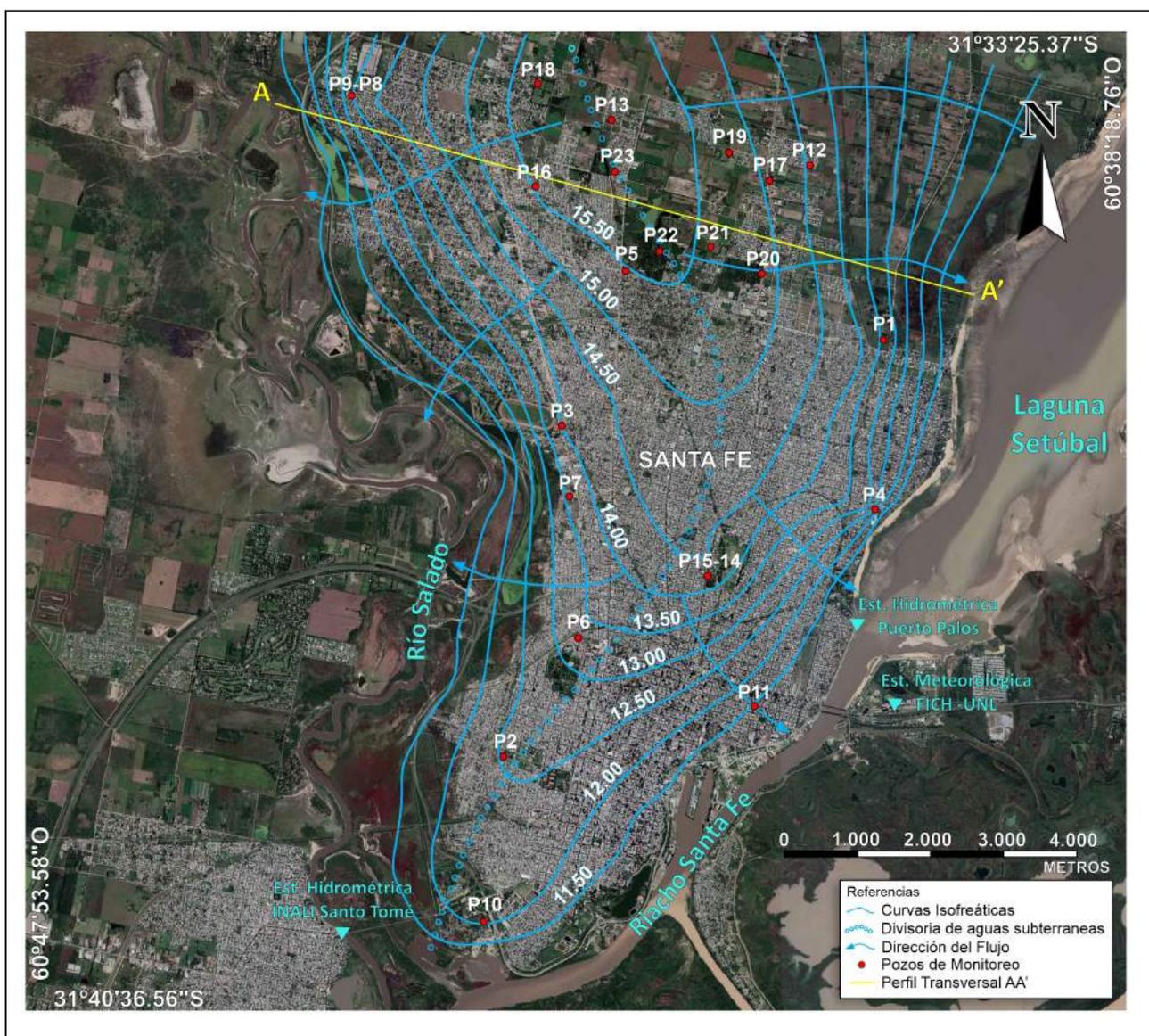


Figura 2. Ubicación Pozos de Monitoreo. Curvas isofreáticas (septiembre de 2010). Fuente: D'Elia et al., 2011.

como consecuencia de las elevadas precipitaciones (del orden de los 1200mm) y en coincidencia con las crecidas ordinarias de los ríos Salado y Paraná. Luego, descendieron hasta octubre de 2010 y posteriormente, en el período 11/2010-05/2011, ascendieron como respuesta a las precipitaciones estivales y otoñales.

La recarga del acuífero es principalmente directa proveniente de las precipitaciones y se produciría principalmente en el sector norte de la ciudad, donde la impermeabilización por la urbanización es menor y, eventualmente, de los cuerpos de agua superficial con los que se encuentra hidráulicamente conectado. Se observó una divisoria de aguas en el sector central de la ciudad con dirección norte-sur que divide el sentido de escurrimiento del agua subterránea hacia las zonas de descarga, hacia el oeste (río Salado) y hacia el este (laguna Setúbal). Esta situación ha sido

corroborada a través del análisis de la superficie freática (D'Elia *et al.*, 2011). En la Figura 2 se presentan las curvas isofreáticas en el área de estudio correspondiente a septiembre de 2010.

Del análisis de la calidad química de muestras de agua subterránea surge que un 60% corresponden al tipo bicarbonatada cálcica-magnésica, el 23% son bicarbonatadas sódicas y el resto clorurada y/o sulfatada sódica, según la clasificación de Piper Hill. En general el agua se encuentra dentro de los límites establecidos por Ley 11220 para el agua de bebida, excepto en los pozos P4 y P16 en los que el contenido de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> supera los 45mg/l, en los pozos P16 en el que el contenido de Mn<sup>++</sup> es del orden de los 2mg/l, y P5 donde el contenido de Fe<sup>++</sup> es de 0,6mg/l (D'Elia *et al.*, 2011).

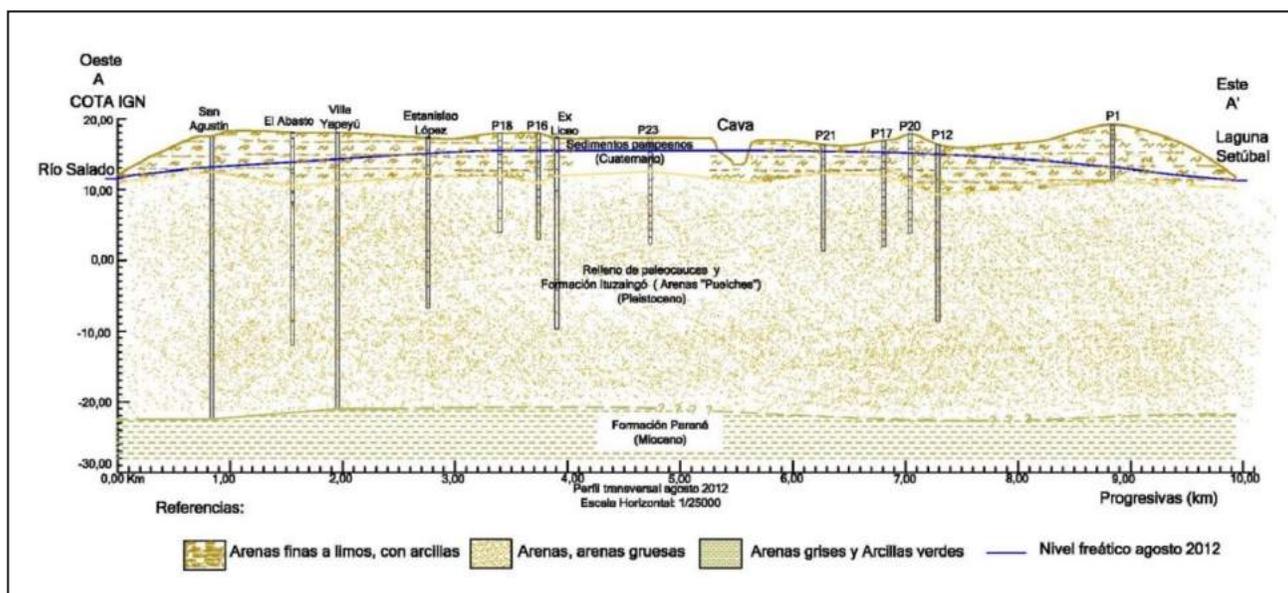


Figura 3. Perfil Estratigráfico A-A'. Fuente: D'Elia *et al.*, 2011.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Aspectos hidrometeorológicos, hidrológicos e hidrogeológicos

Se contó con datos de precipitaciones diarias y mensuales de la Estación Hidrometeorológica ubicada en el parque "Carlos Zapata" de la Ciudad Universitaria de Santa Fe y lecturas hidrométricas diarias del río Salado en las estaciones hidrométricas INALI-Santo Tomé y de la laguna Setúbal en la estación hidrométrica Santa Fe-La Guardia, así como con la cota del cero de las escalas de los hidrómetros de las estaciones mencionadas.

Por otra parte, se dispuso de los registros mensuales de profundidades de los niveles freáticos medidas en tres pozos de monitoreo de la red antes mencionada (P4, P11 y P14) ubicados en sitios que resultaron relevantes para el presente estudio (Figura 2). El pozo P4 se encuentra en el Instituto Nacional del Agua, en el sector noreste de la ciudad a escasos metros de la laguna Setúbal, y el pozo P11 se encuentra en la Planta Potabilizadora de Aguas Santafesinas S.A., en el centro-este de la ciudad, ambos en la zona de circulación y descarga del acuífero hacia la laguna Setúbal. El pozo P14 se ubica en el parque del ex - Jardín

Botánico en cercanías de la divisoria de aguas subterráneas, pudiendo descargar hacia el este en laguna Setúbal como así también hacia el oeste en el valle del río Salado. El período de análisis del presente trabajo abarca 10 años, 08/2008 - 08/2018 y coincide con el período de registro de niveles de agua subterránea en los pozos de monitoreo de la red. Estos registros fueron proporcionados por el Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (GIG-FICH-UNL).

En la Tabla 1 se sintetiza la información disponible hidrometeorológica, hidrológica e hidrogeológica para el período mencionado, la frecuencia de medición y la fuente de información.

Los niveles de agua superficial y subterránea se referenciaron al "cero" del IGN y se realizaron gráficos de la evolución de los niveles freáticos en el tiempo y su relación con las alturas hidrométricas de los cuerpos de agua superficiales y con las precipitaciones locales. Sobre la base del análisis de estas relaciones se determinaron las fechas correspondientes con períodos de niveles de agua subterránea extremos, máximos y mínimos.

**Tabla 1. Información hidrometeorológica, hidrológica e hidrogeológica disponible**

INFORMACIÓN DISPONIBLE (Período 2008-2018)				
	REGISTRO	UBICACIÓN / IDENTIFICACIÓN	FRECUENCIA	FUENTE
LECTURA HIDROMÉTRICA	PRECIPITACIÓN	Estación hidrometeorológica FICH - UNL	Diaria	CIM - FICH - UNL <sup>a</sup>
	RÍO SALADO	Estación hidrometeorológica INALI - Santo Tomé	Diaria	CIM - FICH - UNL <sup>a</sup>
	RÍO SALADO	Estación hidrométrica Recreo RP 70	Diaria	CIM - FICH - UNL <sup>a</sup>
	LAGUNA SETÚBAL	Estación hidrométrica Santa Fe - La Guardia	Diaria	SRH <sup>b</sup>
	LAGUNA SETÚBAL	Estación hidrométrica Puerto de Santa Fe	Diaria	PNA <sup>c</sup>
PROFUNDIDAD	NIVEL FREÁTICO	Pozo de monitoreo P4	Mensual	GIG - FICH - UNL <sup>d</sup>
	NIVEL FREÁTICO	Pozo de monitoreo P11	Mensual	GIG - FICH - UNL <sup>d</sup>
	NIVEL FREÁTICO	Pozo de monitoreo P14	Mensual	GIG - FICH - UNL <sup>d</sup>

a Centro de Informaciones Meteorológicas; b Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación; c Prefectura Naval Argentina; d Grupo de Investigaciones Geohidrológicas - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.

Contando con los datos de niveles del agua subterránea de los 23 pozos de la red de monitoreo relevados por el GIG-FICH-UNL en la ciudad, se realizó un análisis espacial de estos niveles para las fechas seleccionadas a través de la elaboración de mapas de curvas isofreáticas utilizando el software Surfer 13 (*Golden Software LLC; 2016*). Estos mapas de curvas isofreáticas obtenidos, se integraron con las curvas de niveles topográficos de la ciudad, y se importaron en Autocad Civil 3D 2020 (*Autodesk Inc.; 2019*), bajo el sistema de coordenadas Gauss Krüger. Además, se incorporó la imagen satelital de la ciudad de Bing Maps (*Microsoft; 2019*).

En relación con la calidad química de muestras de agua subterránea de la ciudad de Santa Fe, se contó con los resultados de análisis realizados por el GIG-FICH-UNL obtenidos de muestras extraídas en los pozos de monitoreo P4 y P14 en fecha 23/02/2010, siendo los parámetros de interés del presente estudio el pH, los cloruros, los sulfatos y el magnesio, a fin de establecer si el agua subterránea de las muestras analizadas es agresiva en contacto con los materiales con que se ejecutan fundaciones, estructuras subterráneas y sus protecciones impermeables, de acuerdo a los valores de referencia de la norma (*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. CIRSOC 201, 2005*).

## Usos del suelo urbano con aprovechamiento subterráneo

### Infraestructura edilicia y vial

Se realizó un relevamiento de campo de construcciones existentes con aprovechamiento subterráneo dentro del área de estudio, y se clasificaron por tipo, incluyendo un conjunto de edificaciones públicas e institucionales, edificaciones particulares; y construcciones de la infraestructura vial con intervención del subsuelo urbano y estaciones de servicio con depósitos de almacenamiento de combustibles subterráneos en la ciudad. También se detectaron tipologías constructivas de edificaciones en altura con usos subterráneos para cocheras y áreas de servicio.

Particularmente, la información referida a edificaciones en altura en la ciudad de Santa Fe para el período 2008-2016, se obtuvo de la Secretaría de Planeamiento Urbano de la Municipalidad de Santa Fe. SPU - MCSF (*Gobierno de la Ciudad*

*y Bolsa de Comercio de Santa Fe, 2008-2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016*). La misma fue sistematizada y analizada según la localización y cantidad de edificios en altura construidos por zonas de la ciudad, la cantidad de subsuelos construidos para cocheras y servicios. Esta información es considerada útil a fin de observar la tendencia del mercado de la construcción en la ciudad, y de identificar aquellas zonas de crecimiento edilicio en altura, para lo cual mediante tareas de campo y de gabinete se hizo un reconocimiento de las áreas de mayor densificación urbana, relacionando las mismas con las áreas de desarrollo urbano que habilita el R.O.U. (*Reglamento de Ordenamiento Urbano. Ordenanza N° 11.748, 2011*). El abordaje del estudio se realizó partiendo del área urbana de la ciudad, avanzando luego hacia un área de interés específico, dentro de la cual se seleccionó un sector para profundizar en mayor detalle el análisis (Figura 4).

### Infraestructura de redes subterráneas de servicios

Se contó con información de las trazas principales y secundarias de la red de la infraestructura de servicios de agua potable y cloacas. Además, la Empresa Aguas Santafesinas S.A., prestataria de los servicios en la ciudad, ha suministrado información de traza, profundidad y características de ambas redes sobre un sector de la ciudad con alta consolidación y demanda de servicios: el Corredor Bv. Pellegrini / Bv. Gálvez, a lo largo del cual se alojan las redes maestras de la ciudad.

También se contó con información de cuencas y subcuencas de aporte del Plan Director de Desagües Pluviales (*Municipalidad de Santa Fe - INA, 2000*) y de trazas principales de la red de drenaje pluvial de la ciudad con su posición georreferenciada, diámetros, secciones y profundidades, y el conjunto de obras de drenajes pluviales existentes, proyectadas y en ejecución.

A su vez, se recopilaron para este estudio, desde el año 2015 en adelante, registros publicados en medios de comunicación locales, especialmente en Diario El Litoral y Diario Uno de Santa Fe, relacionados con casos de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales, y de colapso de las redes de la infraestructura de servicios, todos ubicados dentro del área de estudio.

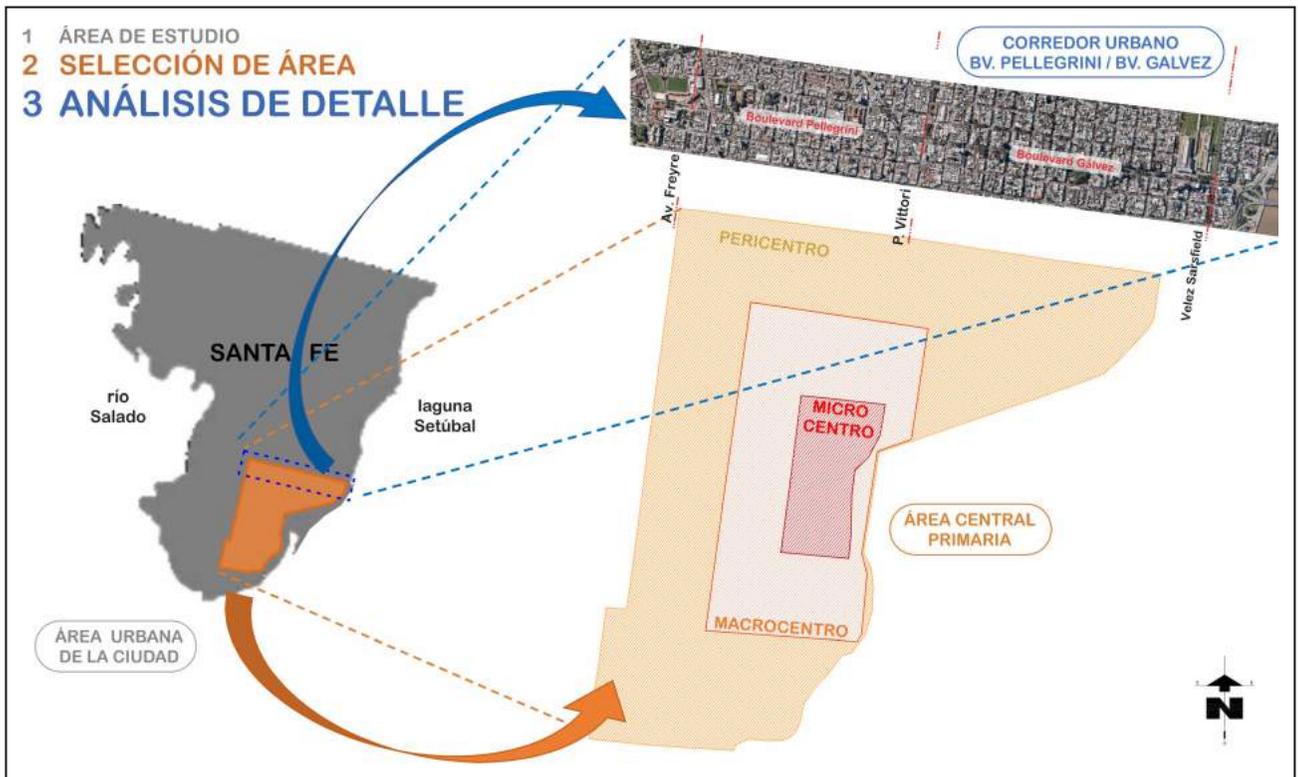


Figura 4. Criterio de abordaje del estudio.

Todos los datos del relevamiento de campo realizado (infraestructura edilicia, vial y de redes subterráneas de servicios, y registros de casos de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales, y de colapso de las redes de la infraestructura de servicios) se ingresaron en un sistema de información geográfica mediante la utilización del software ArcGIS Desktop 10.5 (Esri Inc.; 2016). Con el objeto de que toda la información ingresada se relacione con el entorno urbano de la ciudad, se utilizó información complementaria (metadatos) de manzanos, parcelas, calles, cursos de agua superficial de la ciudad de Santa Fe proporcionados por IDESF e IPEC, bajo el mismo sistema de coordenadas de Gauss Krüger / WGS84 (Sistema Geodésico Mundial 1984).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de las características hidrogeológicas del área de estudio

Para el período 08/2008-08/2018, en la ciudad de Santa Fe se registró una precipitación media anual de 1476mm. En dicho período, los años 2009, 2015 y 2016 se consideraron húmedos con precipitaciones anuales de 1211, 1239 y 1495mm respectivamente, el año 2008 fue un año seco con una precipitación anual de 670mm (Figura 5), mientras que el resto de los años se consideraron típicos, teniendo en cuenta la determinación de años secos, húmedos y típicos realizados por Pagliano (2008) para el período 1901-2007 en la ciudad de Santa Fe. Los meses de verano y otoño presentan los mayores registros de precipitación media mensual (entre 100 y 200mm), mientras que los meses correspondientes a invierno y primavera son de menor precipitación (entre 22 y 60mm) (Figura 6). Desde noviembre del año 2015 hasta mayo de 2016, se presentó en el área de la ciudad de Santa

Fe un período lluvioso con montos de precipitación del orden de los 1125mm (Lanzaro, 2020).

Del análisis de fluctuaciones de los niveles freáticos, se evidenció un comportamiento similar en los pozos de monitoreo P4, P11, P14 durante el período analizado. La Figura 7 muestra las fluctuaciones de los niveles freáticos referidos a cota en relación con las precipitaciones diarias. Se observa que los niveles de agua subterránea ascienden luego de eventos de precipitación, es decir, que el sistema responde ante la llegada del agua de lluvia. Se infiere que la respuesta es rápida, ya que en los días siguientes a la lluvia se manifiesta el ascenso de los niveles del agua subterránea, los cuales se registraron principalmente en verano y otoño (enero a mayo). La profundidad del nivel freático varió desde 1,70m desde el nivel de terreno, hasta aproximadamente 8m.

De acuerdo con las investigaciones existentes, la zona de recarga del acuífero se encontraría en el norte de la ciudad donde se registran los mayores niveles freáticos, y la dirección del escurrimiento subterráneo es hacia el sur, oeste y este, donde se encuentran los cuerpos de agua superficiales que son considerados zonas de descarga. Esta situación, no obstante, podría invertirse en épocas de crecidas de los ríos Salado y/o Paraná. Los pozos P4 y P11 se sitúan al este de la divisoria de aguas subterráneas, y el P14 se encuentra en una zona muy cercana a dicha divisoria de aguas.

La evolución en el tiempo de los niveles freáticos de los pozos de monitoreo P4 y P11, en relación con la altura hidrométrica de la laguna Setúbal (Figura 8) indican que el acuífero, durante todo el período analizado, descarga hacia la laguna Setúbal que se comporta como efluente.

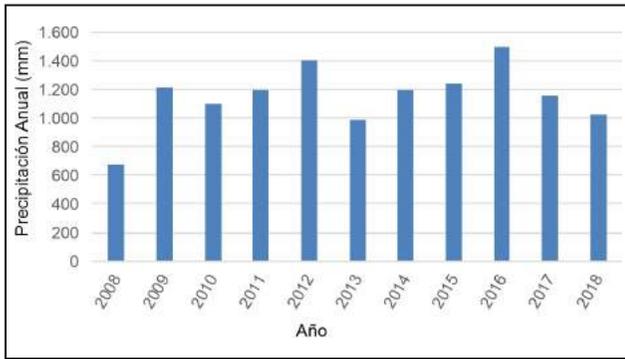


Figura 5. Precipitación Total Anual período 08/2008 - 08/2018.

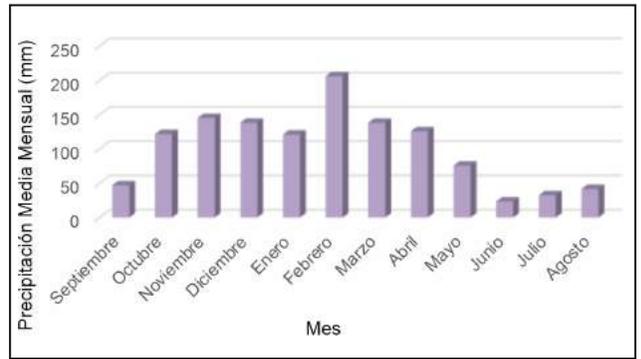


Figura 6. Precipitación Media Mensual período 08/2008 - 08/2018.

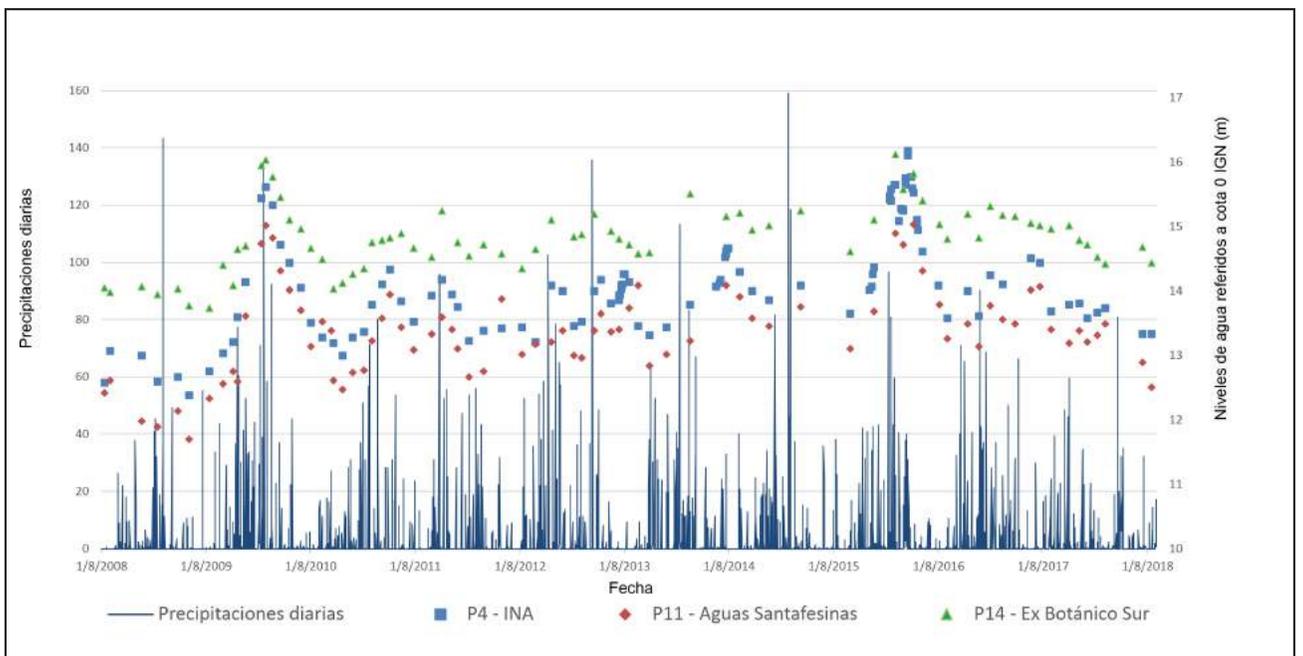


Figura 7. Evolución niveles de agua subterránea vs precipitaciones período 08/2008 - 08/2018.

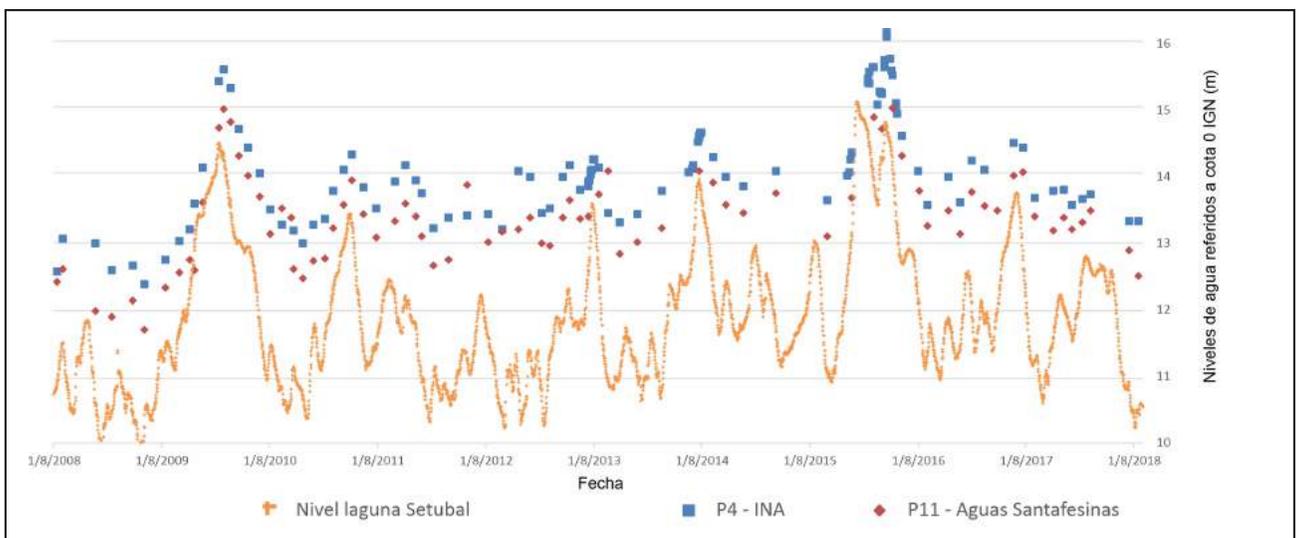


Figura 8. Niveles de agua subterránea vs niveles laguna Setúbal período 08/2008 - 08/2018.

En los años 2010, 2011, 2013, 2014 se registraron alturas hidrométricas en la estación Santa Fe-La Guardia cercanas al nivel de emergencia. En el año 2016 la lectura hidrométrica de la laguna sobrepasó el valor de evacuación de 5,70m (13,98m referido a cota), registrando una altura hidrométrica de 15,13m en el mes de enero y de 14,83m en el mes de abril (Figura 8), en coincidencia con el periodo lluvioso 11/2015-05/2016. Se registraron las menores alturas hidrométricas de todo el período en enero y mayo de 2009 con 9,89m y 9,79m respectivamente, y recientemente en agosto de 2018 con una altura hidrométrica de 10,23m.

El pozo de monitoreo P14, ubicado cercanías de la divisoria de aguas subterráneas, se analiza conjuntamente con la evolución de las alturas hidrométricas del río Salado en la estación INALI-Santo Tomé y de la laguna Setúbal en la estación Santa Fe-La Guardia, observándose un comportamiento similar (Figura 9).

Las mayores alturas hidrométricas se registraron en febrero de 2010 alcanzando 14,11m, 14,68m en enero de 2016 y 14,51m en abril de 2016. El menor registro de todo el período fue en enero y mayo de 2009 con una altura hidrométrica de 9,94m y 9,82m respectivamente; otro período de registros bajos fue octubre de 2012 con 10,09m y recientemente en agosto de 2018 con 10,33m.

Del análisis de los niveles freáticos referidos a cota, se *identificaron períodos de niveles freáticos extremos*, máximos y mínimos (Lanzaro, 2020).

En el período de marzo, abril y mayo de 2016, se registraron los valores máximos de todo el período analizado para los 3 pozos de monitoreo, P4, P11 y P14 (16,17m, 15,04m y 16,12m referidos a cota, respectivamente). Se presentó un período muy lluvioso en febrero-abril de 2016 con 728mm de agua precipitada, y una precipitación anual para el año 2016 de 1495mm que resultó la más alta de todo el período analizado. También se registraron crecidas de los ríos Salado y Paraná que se mantuvieron por un período de 5 meses (enero a mayo) por encima de los niveles de alerta.

Durante los meses de febrero, junio y agosto de 2009, se observaron los niveles de agua subterránea más bajos de todo el período de análisis para los 3 pozos de monitoreo P4, P11 y

P14 (12,39m, 11,69m y 13,74m referidos a cota, respectivamente). Se registraron escasas precipitaciones durante ese período y en los meses previos. El río Salado y la laguna Setúbal presentaron los registros de niveles más bajos del período (9,82m y 9,79m referidos a cota, respectivamente). Recientemente, en agosto de 2018, se observaron niveles freáticos bajos en los 3 pozos de monitoreo, con una situación general previa similar a la del año 2009.

Las fluctuaciones extremas resultaron: P4: 3,78m; P11: 3,35m; y P14: 2,38m.

A partir del estudio de la evolución de los niveles freáticos en los pozos de monitoreo P4, P11 y P14, para el período 08/2008 - 08/2018, se analizó la piezometría en el área de estudio en situaciones extremas seleccionando dos fechas: 03/03/2016 (estado de niveles del agua subterránea máximo), y 17/08/2018 (estado de niveles del agua subterránea mínimo). Con la información de niveles freáticos en los pozos de monitoreo en estas dos fechas, se trazaron las curvas isofreáticas máximas (Figura 10) y las curvas isofreáticas mínimas (Figura 11) para la ciudad de Santa Fe, con una equidistancia de 0,50m.

En ambos casos se observa una configuración de curvas piezométricas similar y se corrobora la existencia de la divisoria de aguas subterráneas en el centro de la ciudad con dirección norte-sur que divide el flujo hacia la laguna Setúbal al este y hacia el río Salado al oeste. Los mayores valores de niveles freáticos se presentan en el centro-norte, indicando la presencia de una zona de recarga. En la situación de niveles freáticos mínimos (Figura 11), la separación de curvas es menor indicando mayores gradientes hidráulicos y mayor velocidad del flujo hacia la zona de descarga.

En relación con la calidad química de muestras de agua subterránea de la ciudad de Santa Fe, se observa que la concentración de sulfatos y magnesio, y el pH obtenidos de las muestras de agua extraídas en los pozos de monitoreo P4 y P14 en fecha 23/02/2010, se encuentran fuera de los rangos de niveles de agresividad definidos por la norma CIRSOC 201, 2005 (Tabla 2.3 de la norma), resultando inferiores respecto al nivel moderado de agresividad, el mínimo previsto (Tabla 2).

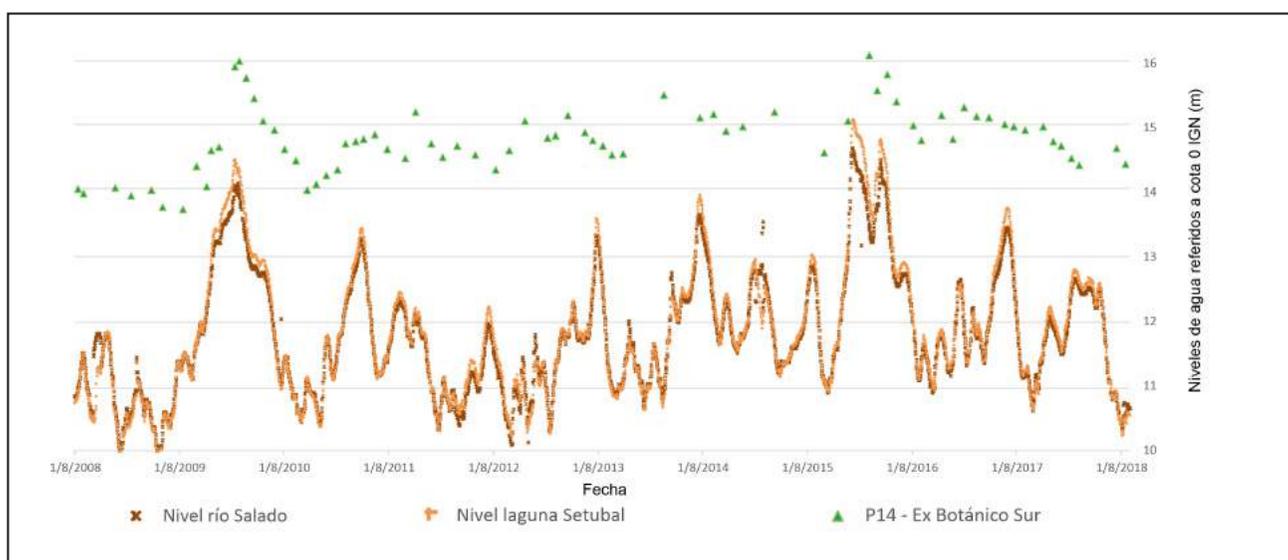


Figura 9. Niveles agua subterránea vs niveles río Salado y laguna Setúbal 08/2008 - 08/2018.

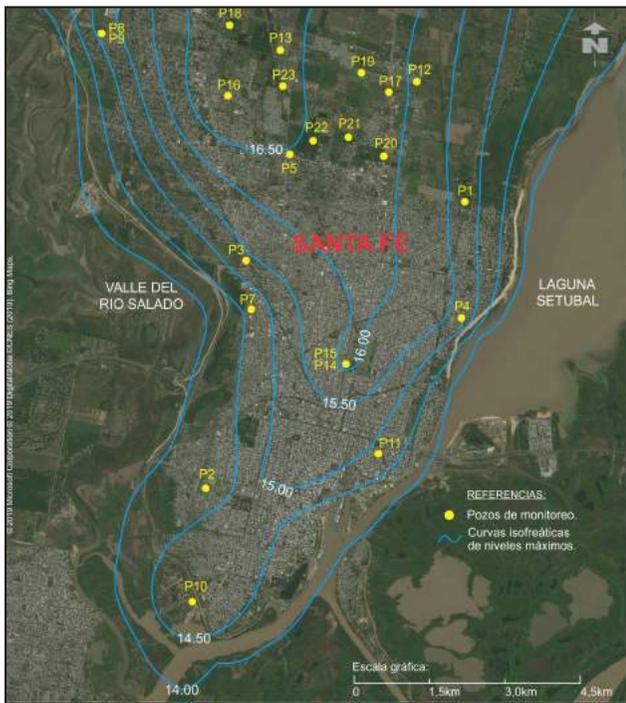


Figura 10. Curvas isofreáticas máximas 03/03/2016.

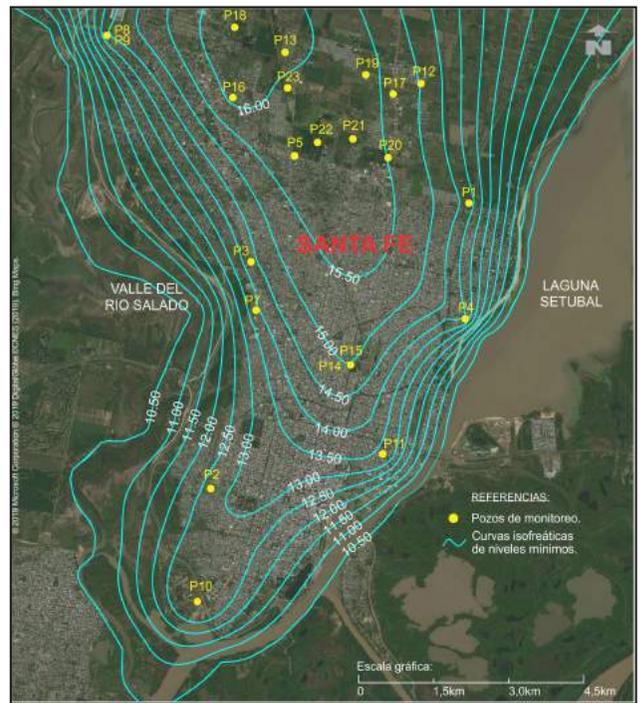


Figura 11. Curvas isofreáticas mínimas 17/08/2018.

Tabla 2. Comparación de parámetros químicos del agua subterránea

Parámetros	Análisis químicos agua subterránea (23-02-2010) GIG		Valores guía CIRSOC 201, 2005		
	Pozo de Monitoreo		Rangos límite		
	P4	P14	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte
pH	7,60	7,66	6,5 a 5,5	5,5 a 4,5	> a 4,5
Sulfatos (mg/L)	50,80	40,20	150 a 1.500	1.500 a 10.000	< de 10.000
Magnesio (mg/L)	29,30	20,60	300 a 1.000	1.000 a 3.000	< de 3.000

### Análisis del uso del suelo urbano con aprovechamiento subterráneo

Del análisis del relevamiento realizado (Lanzaro, 2020) se constató que:

- Existe un predominio de edificaciones (79,12%) sobre el resto de las construcciones con aprovechamiento subterráneo. Las edificaciones públicas-institucionales representan el 52,78% y las particulares o privadas el 47,22%.
- Las tipologías de edificaciones en altura, representan solo el 10,53% del total de edificaciones públicas-institucionales. En cambio, existe un alto porcentaje (82,35%) de edificaciones en altura en el caso de edificaciones particulares con aprovechamiento subterráneo relevadas. De ese total de edificios en altura (82,35%), el 28,57% de los mismos se terminaron de construir en los últimos 5 años y en la actualidad existe un 42,86% en ejecución, esto habla de un proceso afianzado desde hace aproximadamente una década y con una perspectiva creciente hacia el futuro.

- Existen edificaciones con aprovechamiento subterráneo con patologías edilicias relacionadas con el ingreso de agua subterránea por filtraciones, alcanzando el 55,26% de edificaciones públicas-institucionales y el 41,18% de las de edificaciones particulares.
- Dentro del área de interés específico denominada en la normativa urbana como área central primaria (microcentro, macrocentro y pericentro), sector más consolidado, densificado y con alta demanda de servicios de la ciudad, se constató que la mayor concentración de construcciones con aprovechamiento subterráneo relevadas y registro de casos informados se ubican en el pericentro, superando el 50% en todos los casos: 55% de estaciones de servicios; 50% de edificios en altura; y 56,76% de casos de hundimientos, socavones, problemas geotécnicos/estructurales y de rotura de redes, más un 21,62% en las adyacencias.
- Sobre el sector seleccionado para mayor detalle en el análisis, denominado Corredor Urbano Bv. Pellegrini / Bv. Gálvez, eje especializado de tipo residencial, comercial jerarquizado, y con alto valor patrimonial y

paisajístico-ambiental, ubicado en el centro de la ciudad, de 25 cuadras de extensión con sentido este-oeste, se constató que los índices de edificabilidad: factor de ocupación del suelo (F.O.S.) y factor de ocupación total (F.O.T.) determinados por la normativa urbana (ROU) son los más elevados de toda la ciudad y han propiciado la densificación urbana dando lugar a un importante proceso de sustitución edilicia.

## Integración de los resultados

Se realizó la integración de resultados de los aspectos hidrogeológicos del área de estudio con los usos del suelo urbano con aprovechamiento subterráneo, considerando conjuntamente los mapas de curvas isofreáticas máximas y mínimas obtenidos (Figuras 10 y 11), el mapa de curvas de niveles topográficos de la ciudad de Santa Fe y el corredor urbano seleccionado (Figuras 12 y 13).

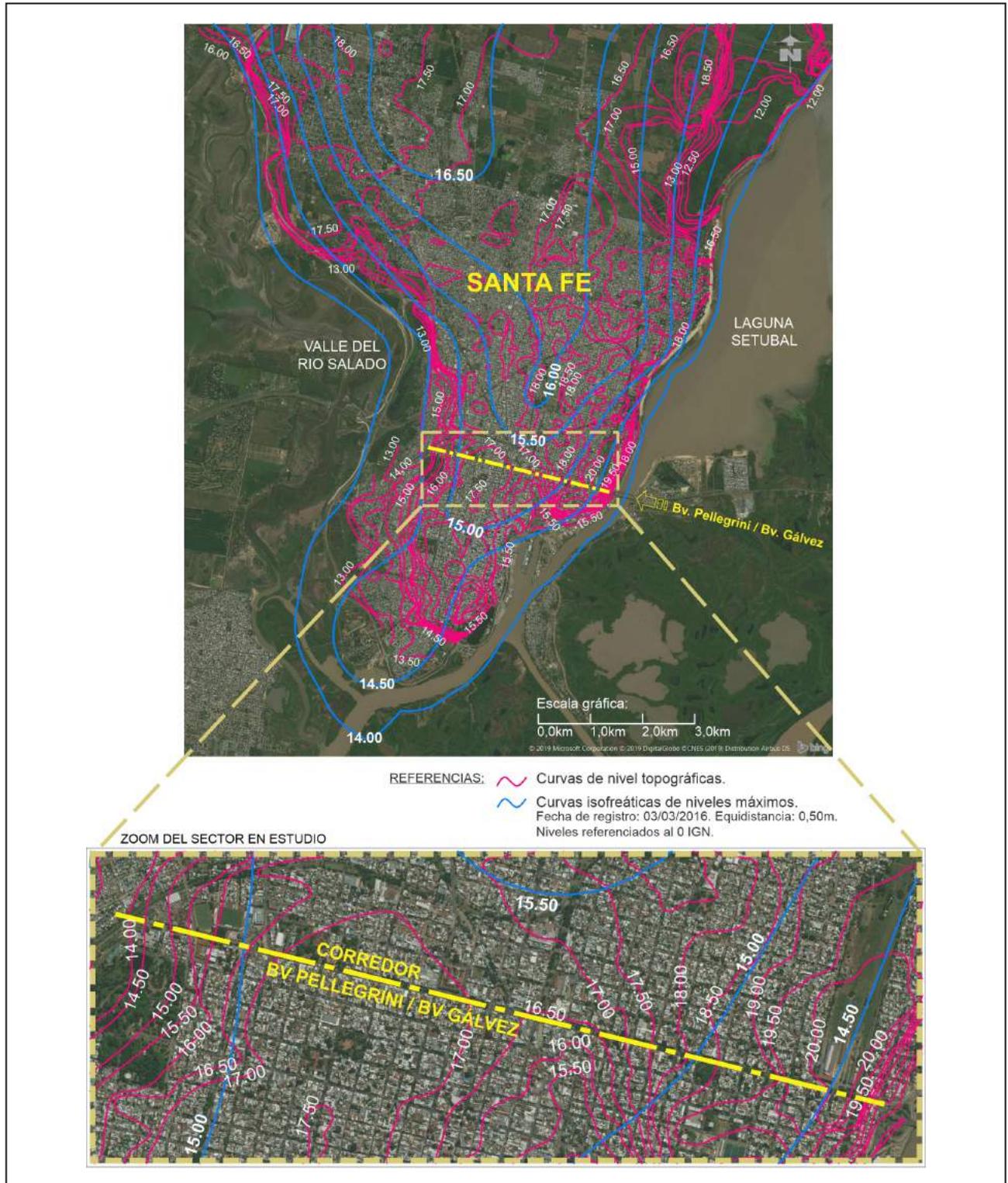


Figura 12. Corredor Bv Pellegrini / Bv Gálvez sobre curvas isofreáticas máximas y curvas de nivel topográfico.

Con esta información espacial se generó un perfil longitudinal oeste-este de esta área de detalle, en el que se incluyeron niveles topográficos y niveles freáticos máximos y mínimos (Figura 14).

A lo largo del corredor se localizan cinco Estaciones de Servicio que poseen sus depósitos subterráneos de combustibles y numerosos edificios en altura. En la mano norte del corredor se han constatado 22 edificios en altura, 2 de ellos en ejecución,

y sobre la mano sur existen 26 edificios en altura, 8 de ellos en ejecución; alcanzando un total de 48 edificios.

También en este corredor, a partir del año 2014 se han registrado, de manera cada vez más frecuente, socavones de gran magnitud resultado del colapso y fugas en las redes de infraestructura de servicios de la ciudad que silenciosamente han provocado el arrastre de partículas finas de suelo dando lugar a socavones y hundimientos en calzadas y veredas.

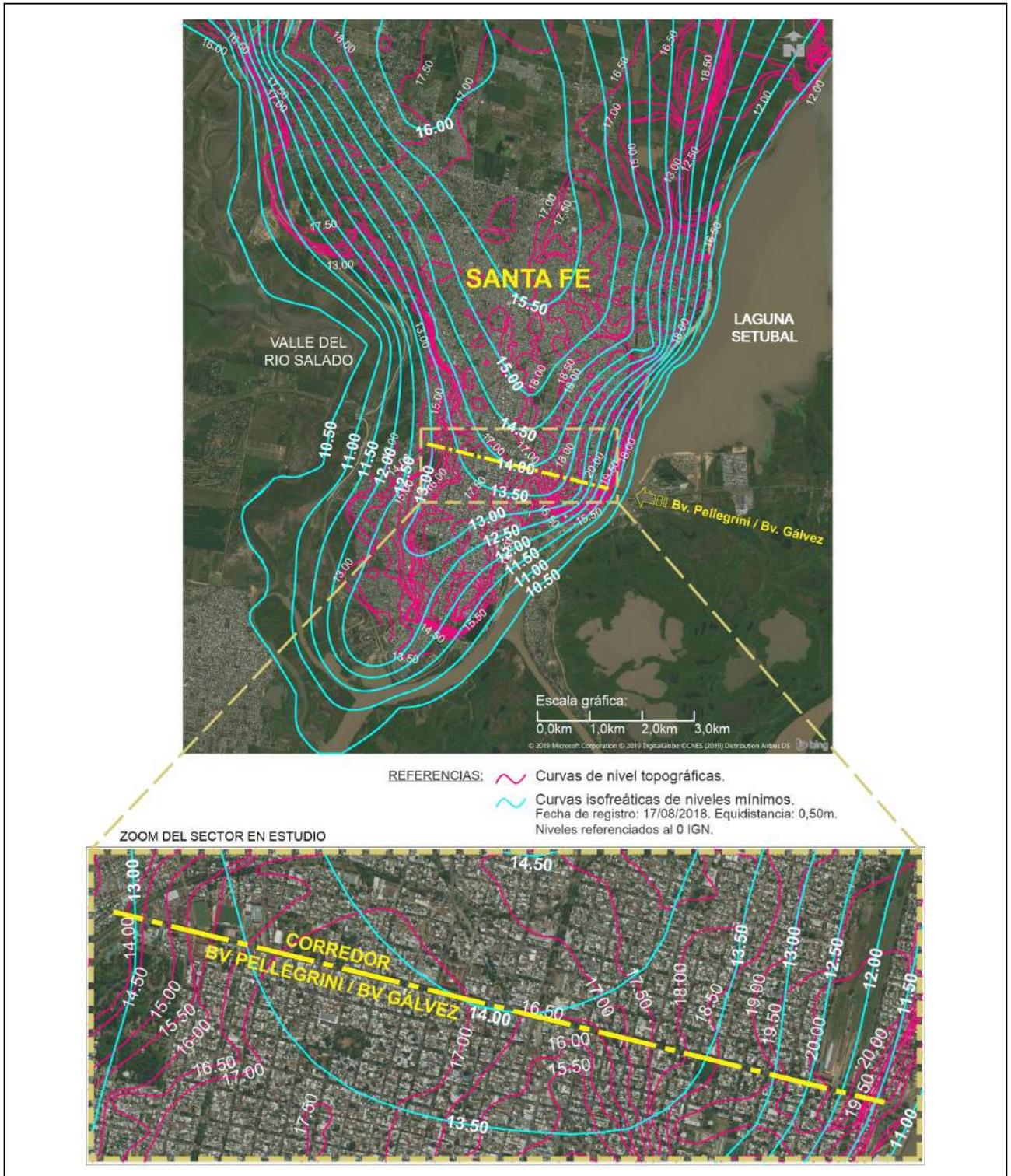
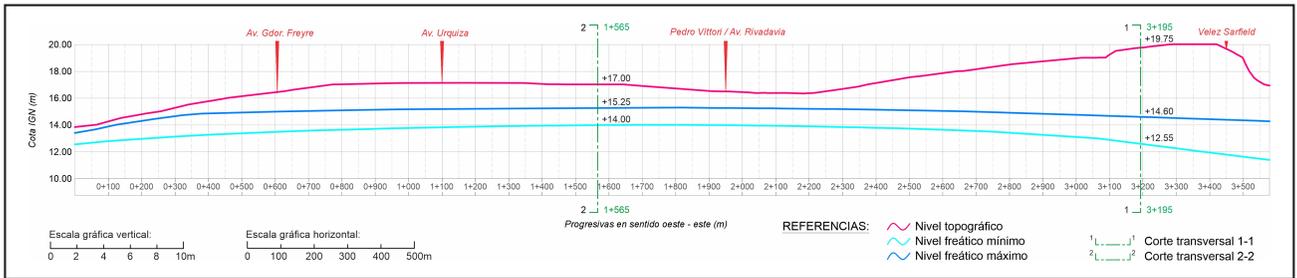


Figura 13. Corredor Bv Pellegrini / Bv Gálvez sobre curvas isofreáticas mínimas y curvas de nivel topográfico

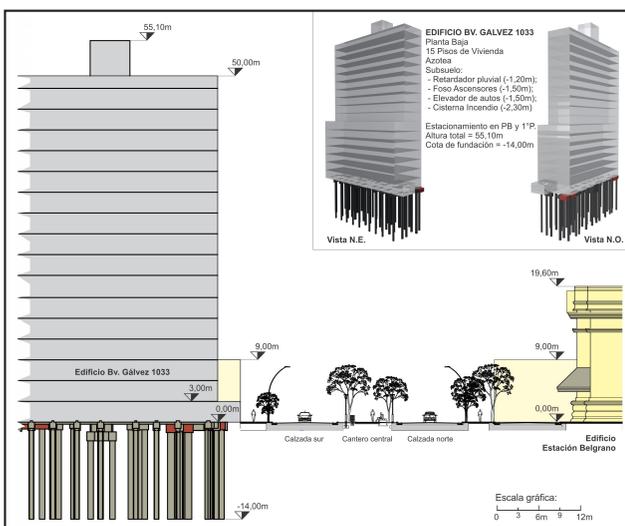


**Figura 14. Corredor Bv Pellegrini / Bv Gálvez. Corte longitudinal. Niveles topográficos y niveles freáticos extremos (máximos: 03/03/2016 y mínimos: 17/08/2018).**

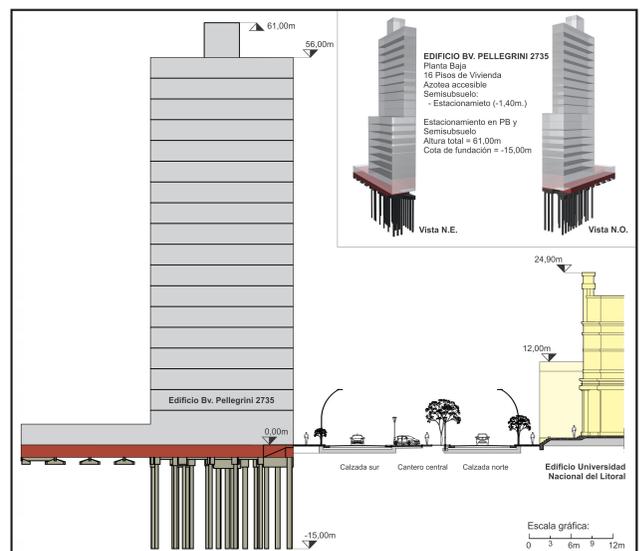
Completando el análisis espacial, se ubicaron sobre el Corredor Bv. Pellegrini / Bv. Gálvez dos secciones o cortes transversales, los cuales se posicionaron en el corte longitudinal (Figura 14). Uno hacia el extremo este de Bv. Gálvez, próximo a la laguna Setúbal, denominado Corte 1-1 (Figura 15); y el otro hacia la zona media del corredor sobre Bv. Pellegrini, denominado Corte 2-2 (Figura 16).

En ambos cortes transversales se posicionaron las redes de la infraestructura de servicios de agua potable, cloacas y drenaje pluvial de la ciudad, con sus diámetros, secciones y profundidades. Asimismo, se plasmó el volumen y profundidad de fundaciones y recintos subterráneos de los edificios en altura existentes con el objetivo de ilustrar la magnitud de interferencias alojadas en el subsuelo urbano que resultan invisibles desde la superficie. A partir de la información generada en la Figura 14 con el perfil longitudinal del corredor, se obtuvo para cada corte transversal el rango de las fluctuaciones de los niveles del agua subterránea del período de análisis (08/2008 - 08/2018) en las fechas determinadas de períodos extremos máximos y mínimos (03/03/2016 y 17/08/2018, respectivamente) y los niveles topográficos. El posicionamiento de la información mencionada se visualiza para el Corte 1-1 en la Figura 17, y para el Corte 2-2 en la Figura 18 (Lanzaro, 2020).

En el Corte 1-1, se detectó un rango de fluctuación del agua subterránea de 2,05m, con niveles máximos a -5,15m de profundidad, y niveles mínimos a -7,20m de profundidad, desde el nivel 0,00m en vereda. El sector se encuentra a escasos 300m de la zona de descarga del agua subterránea con pendiente de escurrimiento hacia la laguna Setúbal. Los niveles topográficos del sector son de +19,75m referidos a cota IGN, siendo uno de los sectores más altos de la ciudad por ser una zona contigua a la Estación y vías del FFCC Belgrano. La cañería maestra de cloacas de la ciudad, alojada a lo largo del boulevard, bajo el cantero central, de gran diámetro (1700mm) se encuentra a una profundidad de -8,05m desde el nivel de vereda; también en este tramo se ubican caños de la red de agua potable de 300 y 400mm de diámetro y otras cañerías de menor sección pertenecientes a conexiones de colectores cloacales domiciliarios. Se observó que en su mayor parte las redes se encuentran alojadas dentro de los estratos no saturados de suelo, a excepción de la cloaca máxima que se encuentra en contacto permanente con el agua subterránea (suelo saturado). Los recintos subterráneos como la sala de máquinas, foso de ascensores, retardador pluvial, cisterna de incendio y elevador mecánico de vehículos del Edificio de Bv. Gálvez 1033, se encuentran por encima del suelo saturado, sin contacto directo con el agua subterránea en períodos de niveles freáticos altos, con probabilidad de ascenso de humedad por capilaridad (Lanzaro, 2020).



**Figura 15. Corte transversal 1-1. Boulevard Gálvez al 1000**



**Figura 16. Corte transversal 2-2. Boulevard Pellegrini al 2700**

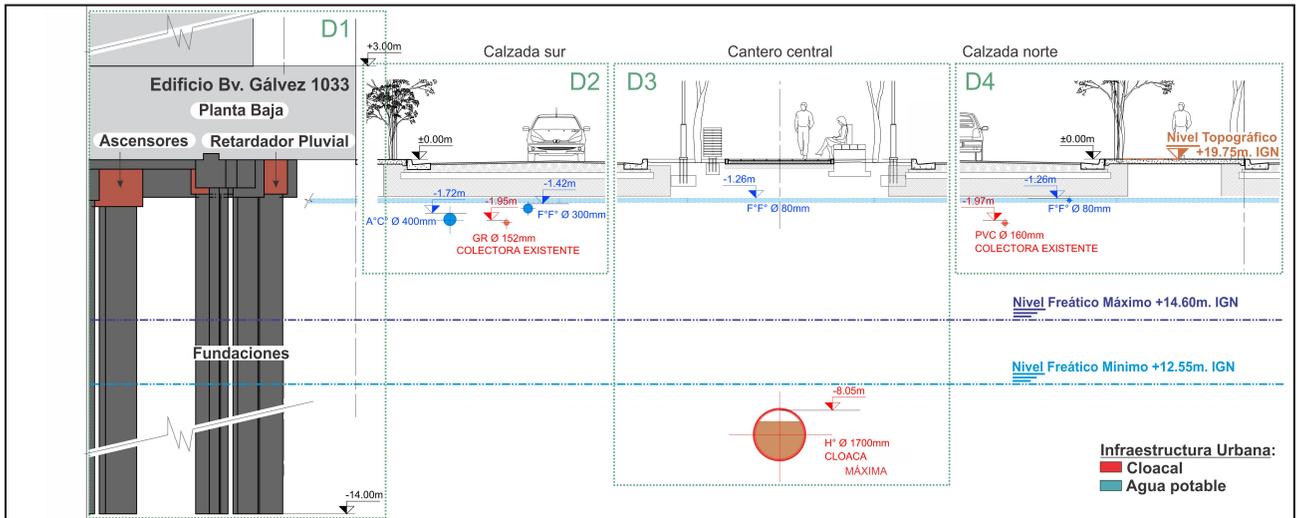


Figura 17. Fluctuaciones extremas de niveles del agua subterránea en el período 08/2008 - 08/2018, en Corte 1-1.

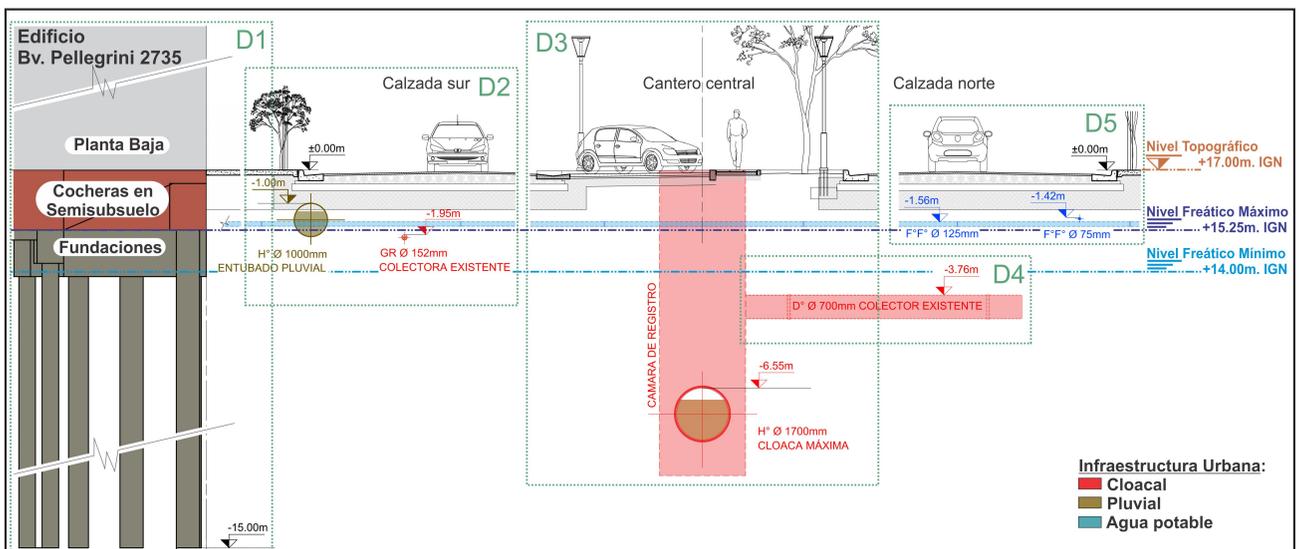


Figura 18. Fluctuaciones extremas de niveles del agua subterránea en el período 08/2008 - 08/2018, en Corte 2-2.

En el Corte 2-2, se detectó un rango de fluctuación del agua subterránea de 1,50m, con niveles máximos a -1,75m de profundidad, y niveles mínimos a -3,00m de profundidad desde el nivel 0,00m en vereda. El sector se encuentra próximo a la divisoria del escurrimiento de agua subterránea, hacia el oeste (río Salado) y hacia el este (laguna Setúbal). Los niveles topográficos del sector son de +17,00m referidos a cota IGN. La cañería maestra de cloacas de la ciudad, alojada a lo largo del boulevard, bajo el cantero central, de gran diámetro (1700mm) se ubica a una profundidad de -6,55m desde el nivel de vereda, también existe una cámara de registro que recibe un caño colector cloacal de 700mm de diámetro que vuelca en la cloaca máxima, un caño entubado pluvial de 1000mm de diámetro; y otras cañerías de menor sección pertenecientes a conexiones de colectores cloacales domiciliarios. Se observó que gran parte de las cañerías se encuentran alojadas en estratos de suelo en contacto permanente con el agua subterránea (suelo saturado). Además, los recintos subterráneos como las cocheras del Edificio de Bv. Pellegrini

2735 se encuentran en contacto con agua subterránea en períodos de niveles freáticos altos, lo cual da lugar a una acción de subpresión que ejerce el agua bajo la platea de fundación del recinto, y posibles empujes laterales si los niveles freáticos superaran el fondo del recinto, humedad ascendente por capilaridad, riesgos de infiltración de agua en el interior, etc. A su vez, en período de niveles freáticos altos, la cañería de la red pluvial podría correr riesgo de flotación, especialmente en momentos en donde no se transportan fluidos (Lanzaro, 2020).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos permitieron establecer relaciones entre el sistema acuífero que subyace a la ciudad de Santa Fe y las construcciones subterráneas existentes.

Como se expuso anteriormente, la ciudad de Santa Fe se ve afectada por los regímenes del río Salado y del sistema río Paraná - laguna Setúbal y por una alternancia de períodos

lluviosos y secos. Ante estos eventos se observó que el sistema hídrico subterráneo reacciona elevando los niveles de agua subterránea, pudiendo alcanzar niveles próximos a la superficie del terreno y estar en contacto con redes de la infraestructura urbana de servicios y las estructuras y recintos subterráneos, o disminuyendo sus niveles. A lo largo de los 10 años del período analizado (08/2008 - 08/2018), se ha observado que la profundidad del nivel freático varió entre 1,70m y aproximadamente 8m desde el nivel del terreno y que las fluctuaciones de los niveles freáticos variaron entre 2,40 y 3,80m en los pozos censados, y entre 1,25 a 2,00m en las secciones urbanas estudiadas. Además, se observó que el agua subterránea es principalmente de tipo bicarbonatada cálcica. Cabe destacar que estas observaciones fueron posibles debido a la existencia de una red de monitoreo del agua subterránea en la ciudad que lleva más de 10 años de operación.

Por otra parte, el relevamiento edilicio realizado permitió constatar la existencia de numerosas construcciones con aprovechamiento subterráneo, especialmente bajo la tipología de edificios en altura, resultado de la alta rentabilidad de emprendimientos privados, y de los incentivos de la normativa urbana propiciando la alta densidad mediante el incremento de los indicadores urbanísticos de edificabilidad. Particularmente, en el área de detalle estudiada se observó un entramado de interferencias en el subsuelo urbano, formado por recintos subterráneos, fundaciones y la infraestructura de redes subterráneas de servicios que ante niveles freáticos altos podrían estar expuestos a presión hidrostática lateral o de subpresión, con deterioro de materiales, filtración en los recintos, etc.; y ante el descenso de niveles freáticos, con posibilidad de asentamientos diferenciales de terreno y hundimientos que dañan edificios, calles, estructuras superficiales y redes subterráneas.

De hecho, la existencia de numerosas edificaciones afectadas con patologías edilicias relacionadas con el ingreso de agua subterránea por filtraciones permitió inferir que las obras se ejecutaron sin integrar al proyecto la consideración de las variaciones de los niveles freáticos ni las previsiones relacionadas con la seguridad, durabilidad y funcionalidad requerida para las obras.

Es de destacar que los valores de pH y las concentraciones de sulfatos, cloruros y magnesio de las muestras de agua subterránea analizadas se encuentran fuera de los rangos de agresividad definidos por la norma CIRSOC 201/2005, lo que indica que las estructuras y protecciones impermeables no estarían en contacto con aguas agresivas.

De lo anteriormente expuesto, surge que las interacciones entre los sistemas acuíferos y las construcciones subterráneas en el subsuelo urbano son complejas y demandan regulación por parte del Estado en todas sus jurisdicciones. Esta regulación debería contemplar lineamientos técnicos y normativos que consideren el conocimiento de las variaciones de los niveles de agua subterránea y de sus características químicas en el tiempo, el uso actual del espacio subterráneo, datos geotécnicos, entre otros.

Así, le correspondería al Estado propiciar la implementación y sostenimiento de redes de monitoreo de agua subterránea, la creación de una base de datos geotécnicos, el inventario del uso actual del espacio subterráneo, así como la sistematización de toda esta información en un sistema de información geográfica y su actualización permanente, para contar con una aproximación completa y real del proceso de urbanización de la ciudad que esté disponible a organismos estatales y privados, a expertos e investigadores para consulta y estudio, sin sustituir la obligatoriedad de realizar tales estudios en el sitio en que se ejecute una obra.

Por otra parte, el ejecutor o desarrollador de la obra debería hacer efectiva la aplicación de buenas prácticas contractuales para la ejecución de las mismas. Estas buenas prácticas deberían incluir diagnósticos preliminares, estudios de línea de base, y de prefactibilidad que aporten información útil relacionada con la estabilidad mecánica para el diseño de fundaciones y estructuras subterráneas, para la selección de las técnicas de excavación y para el dimensionamiento de los elementos resistentes frente situaciones permanentes y temporales; y considerar en la investigación geotécnica, la determinación del rango de fluctuaciones de los niveles del agua subterránea en el tiempo y sus características químicas. Todos estos aspectos, de gran importancia en cuanto a la seguridad de los trabajos, durabilidad y funcionalidad de la obra, permitirían anticipar y evitar desprendimientos y/o inundaciones, seleccionar los materiales apropiados al entorno hidrogeológico y los sistemas de impermeabilización a disponer en la obra, y proveer el nivel de habitabilidad o de estanqueidad requerido para cada tipo de recinto subterráneo.

Finalmente, se resalta que es necesario que el Estado implemente estrategias de gestión en el ámbito urbano y las mismas sean encaradas por equipos interdisciplinarios, tanto en la instancia de conocimiento como para la formulación de políticas y definición de acciones concretas, avanzando hacia la formulación de un plan de gestión integral (hídrico-urbano-ambiental) que sea sostenible en el tiempo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AMBROSINO, S., BARBEITO, O., BERTONI, J. C., DANIELE, A., MAZA, J. A., PAOLI, C. U., & SERRA, J. J. (2004). Inundaciones Urbanas en Argentina (Primera ed.). (J. C. Bertoni, Ed.) Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- CASAROTTO, J. (02 DE SEPTIEMBRE DE 2015). Grietas y hundimientos en viviendas y calles: algunas hipótesis bajo análisis. Santa Fe. Obtenido de [www.ellitoral.com/index.php/id\\_um/118767](http://www.ellitoral.com/index.php/id_um/118767)
- CUSTODIO, E. (2004). Hidrogeología urbana: Una nueva rama de la ciencia hidrogeológica. *Boletín Geológico y Minero, 115, Número Especial, 283-288.*
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M. R. (1983). Hidrología subterránea. *Barcelona: Omega.*

- D'ELIA, M. P., PARIS, M., PÉREZ, M., TUJCHNEIDER, O., PUSINERI, G., PAGLIANO, M. L., & GUALINI, S. (2008). Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas en situaciones de riesgo hídrico en la ciudad de Santa Fe, Argentina. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Primera Fase. Cartagena de Indias.*
- D'ELIA, M. P., PARIS, M., TUJCHNEIDER, O., PÉREZ, M., PAGLIANO, M. L., GUALINI, S., & FEDELE, A. L. (2011). Agua subterránea en áreas urbanas. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrogeología Subterránea. Captación y Modelación de Agua Subterránea, (págs. 46-53). Salta.*
- DÁVILA PORCEL, R. A., & DE LEÓN GÓMEZ, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana: ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 463-477.*
- FOSTER, S., LAWRENCE, A., & MORRIS, B. (1998). Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano. Evaluación de necesidades de gestión y formulación de estrategias. *Documento técnico N° 390. Washington D.C.: Banco Mundial.*
- GOBIERNO DE LA CIUDAD DE SANTA FE. (2016). Santa Fe Resiliente. Evaluación preliminar de resiliencia. *Santa Fe: Secretaría de comunicación y desarrollo estratégico MCSF.*
- GOBIERNO DE LA CIUDAD Y BOLSA DE COMERCIO DE SANTA FE. (2008-2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016). SANTA FE, Cómo Vamos. *Santa Fe: Comunicación institucional MCSF.*
- GÓMEZ OREA, D. (2008). Ordenación territorial. *Madrid: Mundi-Prensa.*
- INDEC - IPEC. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda.
- LANZARO, M. V. (2020). El agua subterránea como condicionante ambiental de construcciones subterráneas en áreas urbanas. El caso de la ciudad de Santa Fe, Provincia de Santa Fe, Argentina. *Tesis de Maestría. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe.*
- LERNER, D. N. (1997). Too much or too little: Recharge in urban areas. *En Chilton et al., Groundwater in the Urban Environment: Volume 1: Problems, processes and management. Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment (págs. 41-48). Nottingham: Balkema.*
- LINCOLN INSTITUTE OF LAND POLICY. (2007). Perspectivas urbanas. Temas críticos en políticas de suelo en América Latina. (M. O. Mullahy, Ed.) Cambridge, Massachusetts, EEUU. *Obtenido de <https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/perspectivas-urbanas-book-full.pdf>*
- MUNICIPALIDAD DE SANTA FE - INA. (2000). Plan Director de Desagües Pluviales. *Santa Fe.*
- PAGLIANO, M. L. (2008). Evaluación de las posibilidades de recarga en áreas urbanas. *XII Encuentro de Jóvenes Investigadores de la UNL. III Encuentro de Jóvenes Investigadores de Universidades de Santa Fe. Santa Fe.*
- REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN. CIRSOC 201. (2005). Buenos Aires, Argentina. *Obtenido de <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/201/reglamento/reglamento201completo.pdf>*
- REGLAMENTO DE ORDENAMIENTO URBANO. ORDENANZA N° 11.748. (2011). Santa Fe. *Obtenido de [http://www.santafeciudad.gov.ar/media/files/ordenanza\\_11748.pdf](http://www.santafeciudad.gov.ar/media/files/ordenanza_11748.pdf)*
- SHANAHAN, P. (2009). Groundwater in the urban environment. *En L. A. Baker, The water environment of cities (págs. 29-48). Cambridge: Springer Science+Business Media.*
- SUÁREZ-BURGOA, L. (2009). Obras subterráneas en conurbaciones. Soluciones debajo de la superficie para problemas en la superficie. *Revista de Arquitectura Universidad Católica de Colombia, 11, 97-107.*
- VÁZQUEZ-SUÑÉ, E., SÁNCHEZ-VILA, X., & CARRERA, J. (2005). Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal 13, 522-533.*