

## **RED DE MONITOREO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS EN LA VERTIENTE SUR DEL RÍO SALADO, PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

D. Ibarlucía<sup>1,2\*</sup>, F. Carmona<sup>1,3</sup>, C. Mancino<sup>1,2</sup>, M. Bayala<sup>1,2</sup>, M. Silicani<sup>1,2</sup>, F. Degano<sup>1,2</sup>, R. Rivas<sup>1,2</sup>, M. Holzman<sup>1,3</sup>, G. Cazenave<sup>1,2</sup>, M. Varni<sup>1,4</sup>, V. Barbero<sup>5</sup>, P. Toscani<sup>5</sup>, I. Castany<sup>6</sup>, D. Ramírez<sup>6</sup>, L. Aguirre<sup>6</sup>, F. Oyarbide<sup>6</sup>, A. Ramallo<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, 7000 Tandil, Argentina

<sup>2</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC), La Plata, Argentina

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

<sup>4</sup> Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Azul, Argentina

<sup>5</sup> Autoridad Del Agua de la Provincia de Buenos Aires (ADA), La Plata, Argentina

<sup>6</sup> REDIMEC S.R.L., Tandil, Argentina

[danielaibarlucia@gmail.com](mailto:danielaibarlucia@gmail.com)

### **Introducción**

Las llanuras son áreas con muy pequeña pendiente superficial, menor al 0,1%, donde los límites de las cuencas son difusos o inexistentes debido a que no suele haber una clara divisoria de aguas, las cuales dependen de la distribución espacial, magnitud y duración de los eventos de lluvia. Características comunes de las llanuras son cursos de agua superficiales con bajo desarrollo de redes de drenaje, niveles freáticos muy cercanos a la superficie del terreno y suelos de granulometría predominantemente fina. A su vez presentan lenta infiltración y largos períodos de acumulación de agua en depresiones, lo que favorece la evapotranspiración. Estos dos últimos procesos son los que predominan en el balance hidrológico. Para el cálculo de la recarga de acuíferos se utilizan la modelación del flujo subterráneo y los balances de masa del ión cloruro. La planificación del drenaje de los excesos hídricos es importante tanto por el impacto en actividades socioeconómicas que se desarrollen en la zona, como por el cuidado de acuíferos con capacidad amortiguadora escasa ante los contaminantes que se encuentren en la cercanía a la superficie (Usunoff et al., 1999).

Las llanuras más extensas del mundo se encuentran en Argentina, China, Hungría, el sudeste de los Estados Unidos y en algunas zonas de Australia. En climas húmedos las llanuras forman humedales, y en climas secos, desiertos. En climas húmedos y sub-húmedos las llanuras son el sostén de actividades económicas primarias como la agricultura y la ganadería, que dependen directamente del suministro de agua (Usunoff et al., 1999).

La llanura Chaco-Pampeana se extiende en Sudamérica por Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y parte de Uruguay. En Argentina está cubierta por una gran cantidad de depresiones de origen eólico, las cuales son cuasi-circulares con orientación Suroeste-Noreste. Estas depresiones suelen acumular agua gran parte del año, de procedencia principalmente subterránea. Pueden existir cursos de agua permanentes por aporte de aguas freáticas con morfología de cauces anchos, poco profundos y con amplias planicies de inundación. Luego de eventos de lluvias importantes las depresiones pueden interconectarse entre sí generando vías de escurrimiento adicionales a ríos y arroyos. La velocidad de escurrimiento es extremadamente lenta y se produce en amplias extensiones del terreno (Usunoff et al., 1999).

La llanura Pampeana se encuentra en la faja de climas subtropicales, donde predominan los ambientes esteparios o semidesérticos. El clima pampeano está determinado por dos centros

permanentes de alta presión: el anticiclón subtropical Atlántico, que emite vientos cálidos y húmedos que ingresan por el norte y noreste (Suriano y Ferpozzi, 1993; Aliaga et al., 2017); y el anticiclón subtropical Pacífico con vientos fríos y secos, que llegan por el oeste y sudoeste (conocido como el Pampero). Otro sistema que contribuye es la sudestada, con vientos fríos y húmedos originados en el Atlántico frente a la Patagonia. Una disminución en las temperaturas medias del planeta coincide con desplazamientos hacia el Ecuador de la posición media de los anticiclones subtropicales Atlántico y Pacífico. En el territorio Argentino este fenómeno se refleja reforzando el sistema de vientos del oeste y sudoeste (el Pampero) que se hace más intenso y frecuente, secando la llanura pampeana debido a que dificulta la entrada de masas de aire cálido y húmedo provenientes del Amazonas y el Atlántico (vientos del norte y noreste). Por ello, avanza el clima desértico sobre la provincia de Buenos Aires, desplazando el clima subtropical húmedo a la Mesopotamia. Por otro lado, cuando las temperaturas medias del planeta aumentan (como ha estado sucediendo en los últimos años), la posición media de los anticiclones subtropicales Atlántico y Pacífico tienden a desplazarse hacia el sur. En la Argentina se evidencia debilitando los vientos del oeste y sudoeste (el Pampero), incrementando la penetración de las masas de aire cálido y húmedo subtropical que provienen del norte y noreste, aumentando la humedad y por consiguiente las precipitaciones en la llanura (Suriano y Ferpozzi, 1993).

Históricamente en la llanura Pampeana, del siglo XVI hasta mediados del siglo XIX (alrededor de 1850), predominaba el Pampero con la denominada “pequeña edad de hielo”. En la época colonial la ganadería se localizaba en la región litoral y en las inmediaciones del Río de la Plata. El resto del territorio bonaerense se consideraba desértico, donde no se desarrollaban actividades agrícola-ganaderas. Hacia la segunda mitad del siglo XIX aumentaron las temperaturas medias del planeta, incrementando la humedad en la zona, lo que permitió la ocupación de dichos territorios, la creación de los ferrocarriles y el desarrollo de la agricultura, conformando lo que hoy se conoce como la Pampa Húmeda. Luego, a principios del siglo XX comenzó la época de excesos de agua dando lugar a las inundaciones que afectaron principalmente el sector ganadero en la cuenca del río Salado (Suriano y Ferpozzi, 1993).

Durante la primera guerra Mundial comenzaron a aparecer periódicamente las sequías, dando lugar a lo que se llamó “la crisis climática de los años treinta”, en el año 1930. El avance de la agricultura en años anteriores llevó a desmontes y al reemplazo de la vegetación natural por cultivos, debilitando el ecosistema ante eventos extremos. Por ello, el arribo de la sequía fue el principal agravante de la crisis socioeconómica de esa época, afectando la producción agrícola-ganadera que era el sustento de la población. A principios de la década de 1960, incrementó nuevamente la humedad (Suriano y Ferpozzi, 1993).

En la provincia de Buenos Aires el agua se reparte de un modo muy irregular, hay meses extraordinariamente secos y otros en los que caen volúmenes de agua enormes. Durante períodos de lluvias, se llenan lagos y lagunas, desbordan ríos y arroyos y se inundan zonas de terrenos bajos. Meses después, lagos y lagunas se encuentran vacíos, arroyos y ríos con cursos entrecortados, y los campos antes inundados se encuentran desnudos cubiertos de polvo fino. Los períodos de grandes sequías son en parte el resultado de una irregularidad de las lluvias, y por otra, de la lenta infiltración que lleva a que el agua acumulada en períodos de lluvia se evapore antes de que infiltre una cantidad suficiente en el suelo de modo que se mantenga humedecido en tiempos de estío (Ameghino, 1884). Por lo tanto, en la provincia hay períodos de inundaciones y sequías alternados.

En cuanto a las inundaciones ocurridas en años cercanos a la actualidad, las más importantes fueron en 1980, 1985, 1991, 1993, 2001 y 2002. De éstas cabe mencionar la inundación del año 1980, que resultó en el anegamiento de 37 partidos bonaerenses cubriendo un total de 4 millones de hectáreas. Se vio afectada la cuenca del Río Salado, cuya área es de 170.000 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicada en el centro y el noroeste de la provincia de Buenos Aires, región en la cual se obtiene el 25% de la

producción agrícola-ganadera nacional. Luego, en el período 2000-2002, se observaron ciclos de inundaciones que afectaron 2 millones de hectáreas en el centro y noroeste bonaerense, registrándose pérdidas mayores a los 700 millones de dólares (Scarpati y Capriolo, 2013). En el año 2012, una inundación afectó 10.5 millones de hectáreas pertenecientes a 26 partidos, en la cual las pérdidas económicas del sector rural se acercaron a los 5.000 millones de pesos. En 2013 una inundación en la ciudad de La Plata produjo 89 muertes y pérdidas económicas estimadas en 3.400 millones de pesos. En 2015, las inundaciones en el río Salado dejaron 800.000 hectáreas bajo el agua, pertenecientes a zonas urbanas y rurales, y afectaron a 20.000 habitantes en el norte bonaerense. Recientemente, en lo que va del 2017 hubo una inundación en abril, que afectó 37 partidos bonaerenses anegando el 30% de los campos de la provincia, y en mayo un temporal en la ciudad de Tandil produjo una inundación con evacuados, y rutas y campos anegados.

Por otro lado, las sequías más graves se produjeron en los años 1974, 1989, 1995, 1996, 1997, 1999 y 2008. Entre ellas se destacan la del año 1996, en la cual estuvo afectado un 67% del territorio provincial y se secaron por completo importantes lagunas, y en 1997 se cortó el curso del río Salado durante un mes. Luego, en 2008 la sequía afectó a todo el país, donde murieron cerca de un millón de cabezas de ganado y el gobierno nacional decretó en Buenos Aires el “desastre agropecuario”, con pérdidas superiores a los 700 millones de dólares (Scarpati y Capriolo, 2013). En años más recientes, en enero del 2012, se vieron afectados 15 partidos bonaerenses y se estimó una pérdida de aproximadamente 3.300 millones de dólares. En 2013 se decretó la emergencia agropecuaria en Bahía Blanca y Patagones. A fines del 2016 y principios del 2017 una sequía azotó las provincias de Río Negro, La Pampa y Buenos Aires. En el caso de Buenos Aires, la sequía afectó 300.000 hectáreas del sudeste que no pudieron ser sembradas, y el sur de la provincia fue castigada por incendios forestales afectando un total de 190.000 hectáreas.

Se ha demostrado que los eventos hidrológicos extremos en la provincia de Buenos Aires constituyen una característica de la misma, considerando los balances de agua en el suelo (zona no saturada) de vital importancia. Estos balances indican que la cuenca del Río Salado es la más sensible a los excesos hídricos, y la región sudoeste de la provincia, la más perjudicada durante las deficiencias hídricas (Scarpati y Capriolo, 2013).

Por ello toman importancia las tareas de prevención como son las obras civiles y las redes de monitoreo de las condiciones principales que intervienen en este tipo de fenómenos, con el fin de dar alerta a las autoridades competentes ya sea en períodos de inundaciones o de sequías.

Una red de monitoreo comprende las actividades relativas a la recolección de datos, diseñados y procesados con un objetivo definido (Guía de prácticas hidrológicas, 1994). Consiste en un arreglo de sensores que conforman las estaciones y en un sistema de comunicación que permite la transmisión de los datos a los centros de monitoreo. Su principal función es el estudio de procesos fundamentales que se dan en el medio ambiente, como así también proveer alerta de amenazas, como por ejemplo de inundaciones, erupciones volcánicas, terremotos, tsunamis, etc. (Hart y Martínez, 2006).

El monitoreo y la recolección de datos hidro-meteorológicos es importante debido a que los eventos naturales como precipitaciones, temperaturas, velocidades del viento, entre otros, son irrepetibles en la naturaleza (Fattorelli y Fernández, 2011). El diseño de una red hidro-meteorológica comprende principalmente el conocimiento hidrológico y climático de la zona en la cual se establecerá.

El criterio de diseño se basa en la elección de puntos estratégicos para la calibración y posterior operación de las estaciones. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece estos criterios con el área (en km<sup>2</sup>) por estación según el tipo de región y variable a monitorear, por lo cual, teniéndolos en cuenta, es posible diseñar una red de medición óptima para la zona de estudio

contando con un número de estaciones representativo que conformen la red de monitoreo (Guía de prácticas hidrológicas, 1994). A continuación en la Tabla 1 se presentan las densidades mínimas de distintos tipos de estaciones en zona de llanura, ya que en el presente trabajo la zona de estudio se encuentra en la llanura Pampeana.

*Tabla 1: densidad mínima por tipo de estación (superficie en km<sup>2</sup>). Adaptado desde Guía de prácticas hidrológicas (1994)*

Tipo de estación	Parámetros	Área (km <sup>2</sup> )
<b>Estación climatológica: pluviométrica</b> <sup>1</sup>	Precipitación	5.750
<b>Estación climatológica: evaporación</b> <sup>2</sup>	Tanque de evaporación, precipitación, temperaturas, viento, humedad relativa	50.000
<b>Estación hidrométrica: flujo fluvial</b> <sup>3</sup>	Caudal	1.875
<b>Estación de calidad del agua</b>	Caudal y parámetros químicos	37.500

<sup>1</sup> Para garantizar el alerta de inundaciones, los pluviómetros deben estar localizados cerca de la estación de aforo de caudal.

<sup>2</sup> La evaporación puede estimarse del balance hídrico, el balance de energía y enfoques aerodinámicos, por lo que en general se define como estación de balance de energía

<sup>3</sup> Su función es obtener información de los recursos hídricos superficiales (distribución y variabilidad en el tiempo)

Para estaciones de monitoreo hidro-meteorológico deben conocerse las condiciones de ríos y arroyos en redes hidrométricas, las características climáticas para estaciones meteorológicas (como precipitaciones, temperatura, radiación, humedad, presión), y los puntos específicos de ingreso de contaminantes en caso de estaciones de calidad del agua (Fattorelli y Fernández, 2011).

En el presente trabajo se centrará la atención en la llanura Pampeana, perteneciente a Argentina. En ella se ubicará la red de monitoreo hidro-meteorológico en la vertiente sur de la cuenca del río Salado, cuyo objetivo es el alerta de inundaciones y sequías. Contar con una base de datos de este tipo es un factor determinante para la toma de decisiones respecto a estos eventos hidrológicos extremos, tanto para el gobierno como para aquellos productores agropecuarios que se vean afectados por los mismos.

## Red de monitoreo hidro-meteorológico

Teniendo bajo consideración las características principales de las llanuras, en particular la llanura pampeana, su sensibilidad ante eventos hidrológicos extremos y poniendo énfasis en la necesidad tanto provincial como nacional de contar con redes de monitoreo que estudien las condiciones más importantes que intervienen en dichos eventos, surgió el proyecto FONARSEC N° 19 denominado "Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires". Se constituyó mediante la asociación público-privada del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA-CIC), REDIMEC S.R.L. (empresa privada de Tandil) y la Autoridad Del Agua (ADA) de la provincia de Buenos Aires.

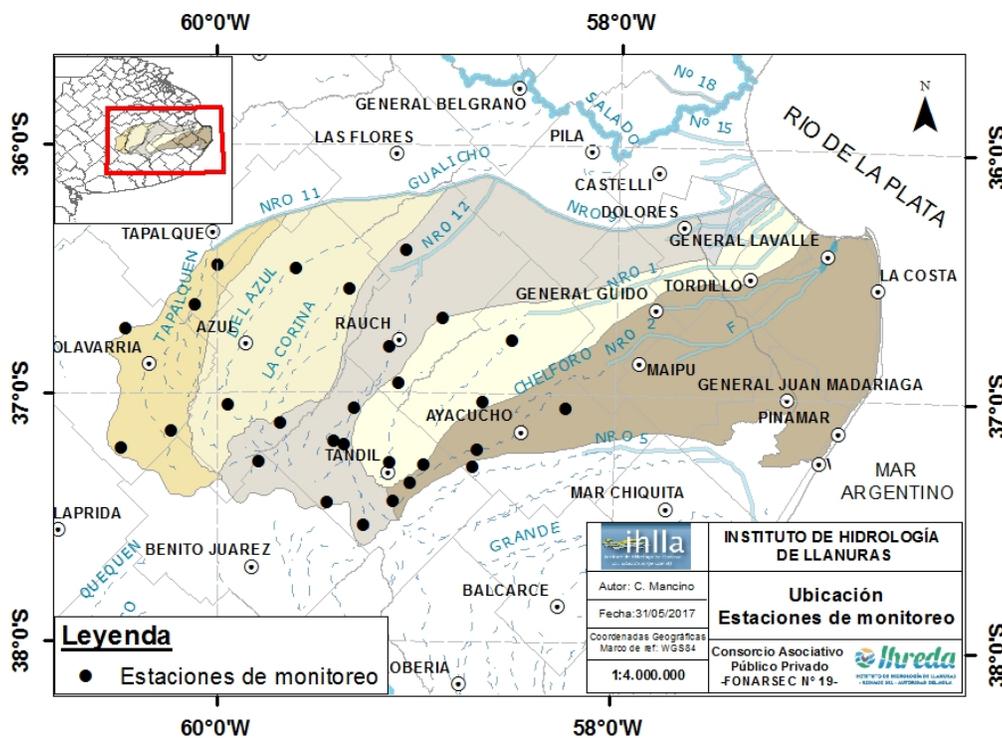
El proyecto se basa en la fabricación de estaciones de monitoreo ambiental con asistencia técnica Argentina para la conformación de una red de monitoreo en la vertiente sur del río Salado. Esta red tiene como objetivo la toma de datos con certificación de calidad y validados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los cuales serán obtenidos mediante estaciones autónomas de bajo mantenimiento equipadas con sensores de alta precisión, ensambladas bajo criterios internacionales (OMM) para asegurar su validez.

Área de aplicación de la red y ubicación de las estaciones

La red estará emplazada en la vertiente sur de la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires. Esta cuenca tiene una extensión de 4 millones de hectáreas, una población total de 500.000 habitantes y pertenece a la llanura Pampeana (www.ihreda.com.ar). Dado que se ha demostrado que es una zona sensible ante eventos hidrológicos extremos (Scarpati y Capriolo, 2013), es importante poner en funcionamiento una red de este tipo. Su función será el alerta de inundaciones y sequías en la zona. Esta será la primera red en la provincia y el país que atienda la necesidad de la obtención de datos de calidad para conformar una base de datos que den sustento en un futuro a la toma de decisiones que involucren a las autoridades tanto públicas como privadas.

La selección de los sitios para la ubicación de las estaciones de monitoreo se determinaron en reuniones técnicas entre la ADA y el IHLLA. En una primera instancia se evaluaron los puntos de una red existente de la ADA operativa desde 1980 hasta el año 2000, en los cuales se realizaban medidas del nivel freático y limnimétricas. Dichos puntos se mantuvieron con el fin de sostener el patrimonio hidrológico provincial. En segundo lugar, se evaluó la ubicación de nuevas estaciones considerando las condiciones actuales de la cuenca, los aspectos geomorfológicos e hidrológicos, usos y manejo de suelos. Mediante el análisis de imágenes satelitales se generaron mapas de situaciones extremas de inundaciones para determinar si la ubicación de las estaciones asignadas, principalmente en zonas cercanas a arroyos, eran convenientes para a partir de ello tomar medidas constructivas, asegurando que las estaciones en dichas situaciones no queden fuera de servicio. En la Figura 1 se observa el área de aplicación de la red de monitoreo con la ubicación de las estaciones.

*Figura 1: área de aplicación de la red y ubicación de las estaciones de monitoreo\**



Se instalarán 28 estaciones de monitoreo clasificadas de la siguiente manera:

- 8 **estaciones limnigráficas**, 3 de ellas estarán acopladas con **estaciones de monitoreo químico**;
- 17 **estaciones de monitoreo meteorológico y freaticométricas**;
- 3 **estaciones de balance de energía**.

Tipos de estaciones

La red de monitoreo del proyecto FONARSEC, como se indicó anteriormente, consiste en 5 tipos de estaciones. A continuación se describirá la función de cada estación y sus respectivos sensores.

La Estación de Monitoreo Meteorológica (EMM) registra las condiciones de los primeros metros de la atmósfera. Está compuesta por sensores de precipitación, velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura y humedad relativa del aire y presión atmosférica (Figura 2).

*Figura 2: Sensores de la EMM*

 <p>Precipitación Sensor: 52202L3. CS</p>	 <p>Temperatura y humedad relativa Sensor: CS215I2. CC</p>
 <p>Velocidad y dirección del viento Sensor: WindSonic2D 4L</p>	 <p>Presión atmosférica Sensor: CS100. CC</p>

La Estación de Monitoreo Limnigráfico (EML) monitorea datos referidos al nivel del agua de los cuerpos superficiales a estudiar. Puede constar de un sensor de presión de la columna de agua instalado en una cámara de quietamiento conectada al curso de agua, o de un sensor de nivel sónico, que mide la distancia desde su ubicación al agua (Figura 3). El sensor sónico requiere la medición de la temperatura del aire para la corrección de los datos, por lo que está acoplado a un sensor de temperatura y humedad relativa del aire (sensor de la Figura 2).

*Figura 3: Sensores de la EML*

 <p>Presión de la columna de agua Sensor: CS451-L. CS</p>	 <p>Nivel sónico Sensor: SR50A-L7. CS</p>
--	---

La Estación de Monitoreo Freatimétrica (EMF) registra datos del agua subterránea perteneciente al acuífero. Está constituida por un sensor de presión de la columna de agua y otro de presión atmosférica (Figura 4).

*Figura 4: Sensores de la EMF*

 <p>Presión de la columna de agua Sensor: CS451-L. CS</p>	 <p>Presión atmosférica Sensor: CS100. CC</p>
--	--

La Estación de Monitoreo de Balance de Energía (EMBE) está integrada por sensores de radiación neta, humedad y temperatura del suelo, reflectividad espectral, flujo de calor en el suelo y temperatura radiativa (Figura 5). La función que cumple está relacionada con la estimación de la evapotranspiración. Este fenómeno es uno de los que interviene significativamente en el balance hidrológico, y cumple un rol importante en el alerta de inundaciones y sequías, ya que los parámetros que registra son determinantes en la infiltración o no del agua que precipite, o en el alerta ante eventos de sequía extremos.

*Figura 5: Sensores de la EMBE*

 <p>Radiación neta Sensor: CNR4. CC</p>	 <p>Reflectividad espectral Sensor: SNR-NR. DD</p>
 <p>Humedad y temperatura del suelo Sensor: CS655-L. CS</p>	 <p>Temperatura radiativa Sensor: SI-111. CC</p>
 <p>Flujo de calor en el suelo Sensor: HFP01-L15. CS</p>	

La Estación de Monitoreo Químico (EMQ) está equipada con sensores de turbidez, conductividad eléctrica y temperatura, pH y potencial redox (Figura 6). Esta estación se utilizará para monitorear la calidad del agua de los cuerpos superficiales y se ubicará aguas debajo de las descargas de tratamiento de efluentes cloacales e industriales de distinta índole.

*Figura 6: Sensores de la EMQ*

 <p>Turbidez Sensor: OBS 3+ . CS</p>	 <p>Conductividad eléctrica y temperatura Sensor: CS547A CS</p>
 <p>pH Sensor: CSIM11-L10</p>	 <p>Potencial redox Sensor CSIM11-ORP-L10</p>

Para caracterizar la precisión de los sensores, se realizó la Tabla 2 donde se encuentra el error en la medición de cada uno de ellos.

*Tabla 2: Error en la medición de cada sensor*

<b>Sensor</b>	<b>Error</b>
<b>Pluviómetro</b>	± 2-3%
<b>Temperatura y humedad relativa</b>	± 0.4 °C ± 4% (Humedad relativa)
<b>Velocidad y dirección del viento</b>	± 3° (dirección) ± 2% (velocidad)
<b>Presión atmosférica</b>	± 1 mb
<b>Presión de la columna de agua</b>	± 0.1%
<b>Nivel sónico</b>	± 1 cm
<b>Radiación neta</b>	± 10%
<b>Reflectividad espectral</b>	± 10%
<b>Temperatura radiativa</b>	± 0.5°C
<b>Humedad y temperatura del suelo</b>	± 3% (humedad) ± 0.5°C (temperatura)
<b>Flujo de calor en el suelo</b>	± 10%
<b>Turbidez</b>	± 2% o 0,5 NTU
<b>pH</b>	± 0.2 pH
<b>Conductividad eléctrica y temperatura del agua</b>	± 5-10% (CE) ± 0,4 °C (Temperatura)
<b>Potencial rédox</b>	1%

#### Resolución temporal de los datos, almacenamiento y transmisión

En cuanto al almacenamiento de los datos, cada estación estará equipada con un logger capaz de almacenarlos a medida que los sensores los registran. Los loggers son de alto nivel tecnológico y contarán con un programa de visualización de datos de origen nacional, lo cual está siendo desarrollado por la empresa REDIMEC. La resolución temporal de los datos depende de cada parámetro a monitorear y del sensor considerado. Los tiempos pueden variar de pocos segundos a varios minutos. Los profesionales a cargo son los que se encargan de determinar el tiempo más conveniente para la toma de datos, teniendo en cuenta los requerimientos establecidos en el manual de cada sensor y las características específicas de cada uno de ellos. Luego, los datos registrados por los sensores serán almacenados en la memoria del logger.

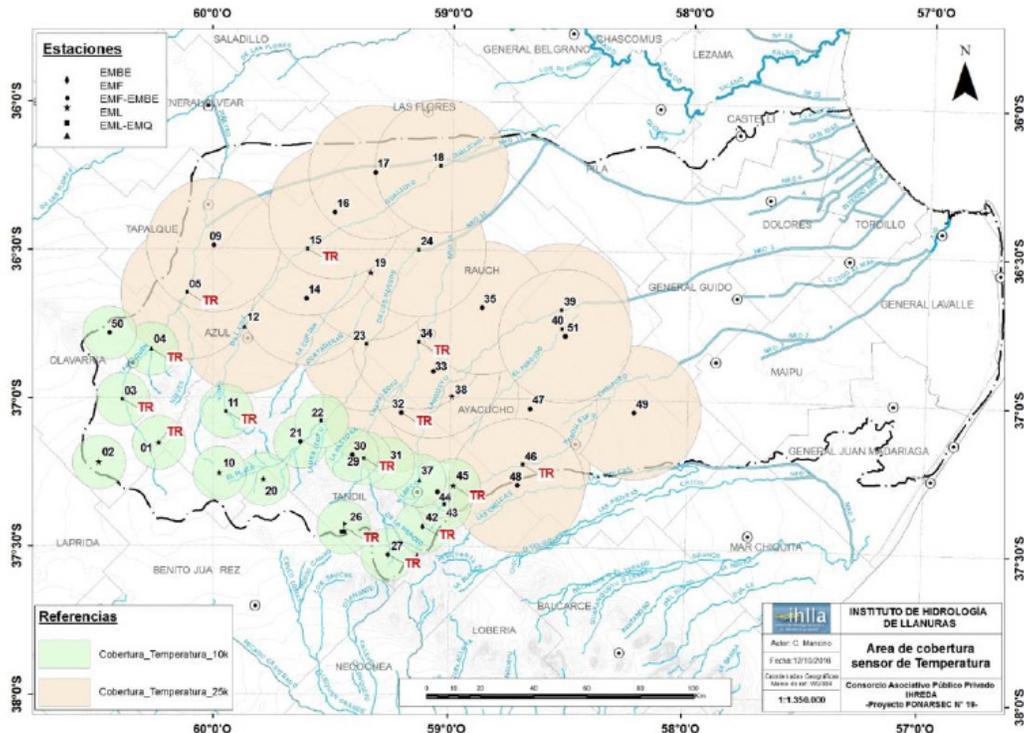
Los datos serán transmitidos de dos maneras: en tiempo real, por medio de transmisión de radio, y diferido por GPRS, satélite (ARGOS). De esta manera, se transferirán a los centros de monitoreo, donde serán analizados. Los datos registrados por el logger, y transferidos por la red tienen un rango normal específico de valores para cada parámetro monitoreado. Valores que se alejen significativamente de dichos rangos, y en conjunto y relación entre los parámetros, establecerán el alerta de los eventos hidrológicos extremos analizados, cumpliendo así la función de la red.

La información será de libre acceso con certificación y validación de datos por el SMN. De este modo, ya sea autoridades municipales, provinciales o nacionales y/o productores y empresarios agropecuarios podrán acceder a la base de datos, dando fundamento a sus decisiones políticas, de planificación de obras, alerta a la sociedad, o bien en el caso de los empresarios, decidir en base a esto sus futuros planes de trabajo.

### Estado actual del proyecto

Al inicio del proyecto se habían definido un total de 49 estaciones. Luego de realizar los análisis del área de cobertura por tipo de estación y de los sensores más importantes de cada una (con los criterios de la OMM, especialmente de las EMM), se redujo el número de estaciones a 28, siendo más representativo de las áreas ya que se daba una densa superposición. A modo de ejemplo se presenta la Figura 7, en la cual se graficó el área de cobertura para los sensores de temperatura del aire sobreestimada (49 estaciones iniciales).

*Figura 7: área de cobertura del sensor de temperatura del aire (EMM)\**

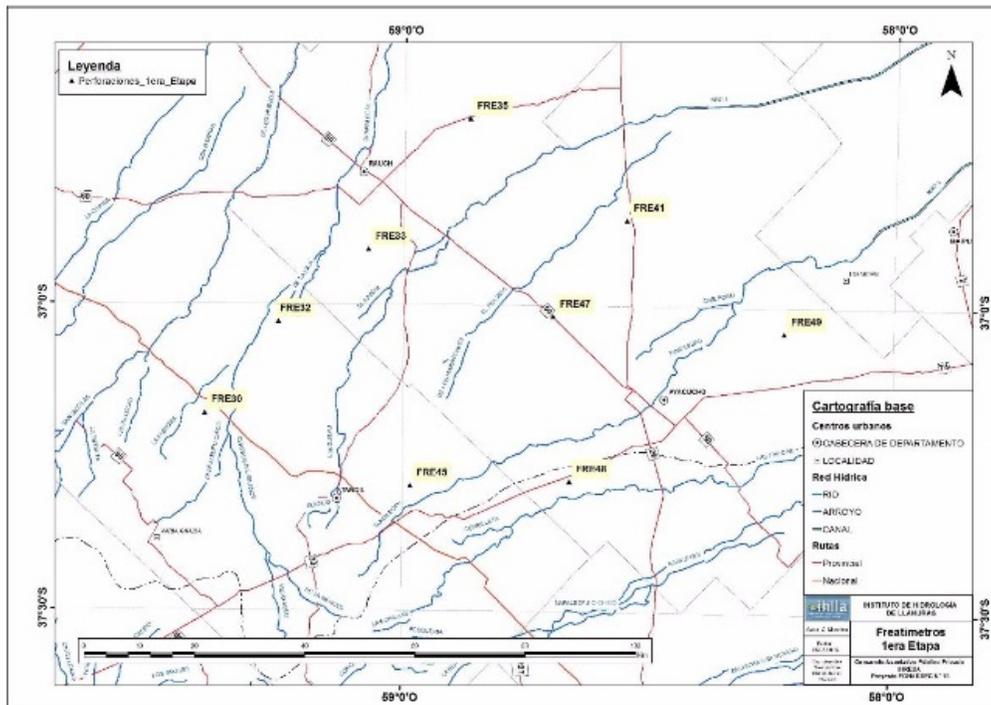


\* Celeste: radio de cobertura de 10 km; corresponde a la naciente de los arroyos de la vertiente sur en área serrana

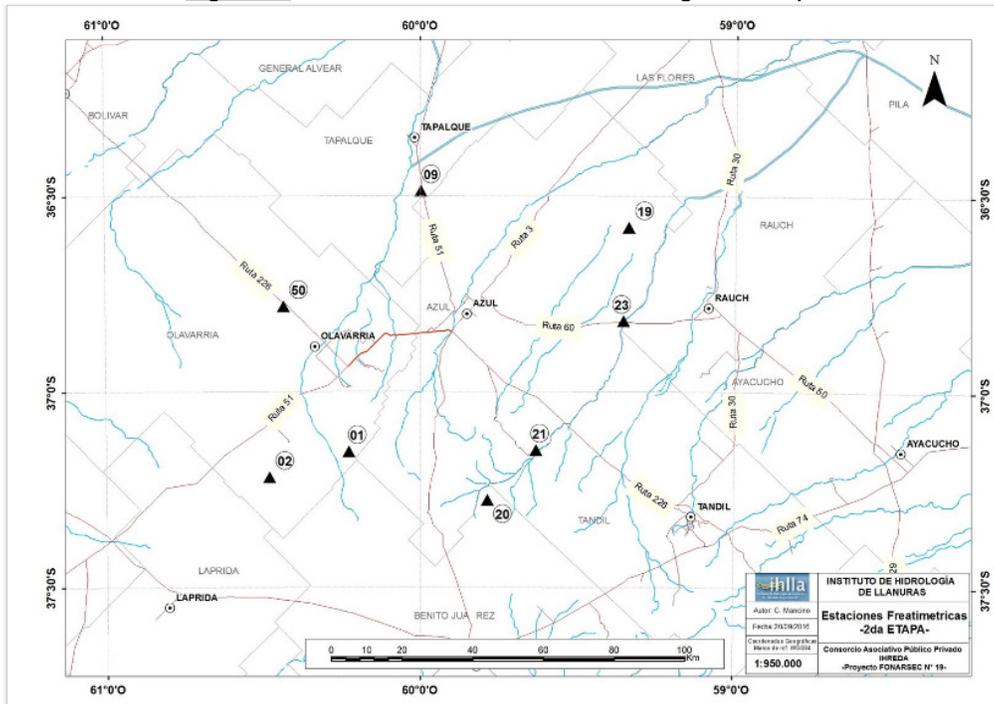
\* Rosa: radio de cobertura de 25 km; área llana con pendiente del orden 1/1000

En relación a las **estaciones freaticas**, se eligieron a partir de la red de freaticas establecida por la ADA (operativa entre 1980-2000). Se hizo un relevamiento del estado en que se encontraban los freaticas y se pudieron recuperar 3. En los sitios donde los freaticas de la red preexistente no se encontraban o estaban destruidos se optó por la construcción de uno nuevo. Se construyeron 9 en la primera etapa (Figura 8), y para la segunda etapa se llamó a concurso de precios para la construcción de 8 freaticas más (Figura 9), con un total final de 17 estaciones freaticas.

**Figura 8:** ubicación de los freatímetros que se encuentran operativos (medidas discretas)\*



**Figura 9:** ubicación de los freatímetros: segunda etapa



Luego de las perforaciones (primera etapa; Figura 10) se realizó un ensayo de bombeo de corta duración (4 horas), donde se midieron los parámetros hidráulicos e hidro-químicos ensayados (caudal de bombeo, tiempo de recuperación, temperatura, conductividad). Luego se tomaron muestras de agua que se analizaron en el laboratorio del IHLLA.

*Figura 10: trabajo de campo para la construcción de los freáticos: primera etapa*



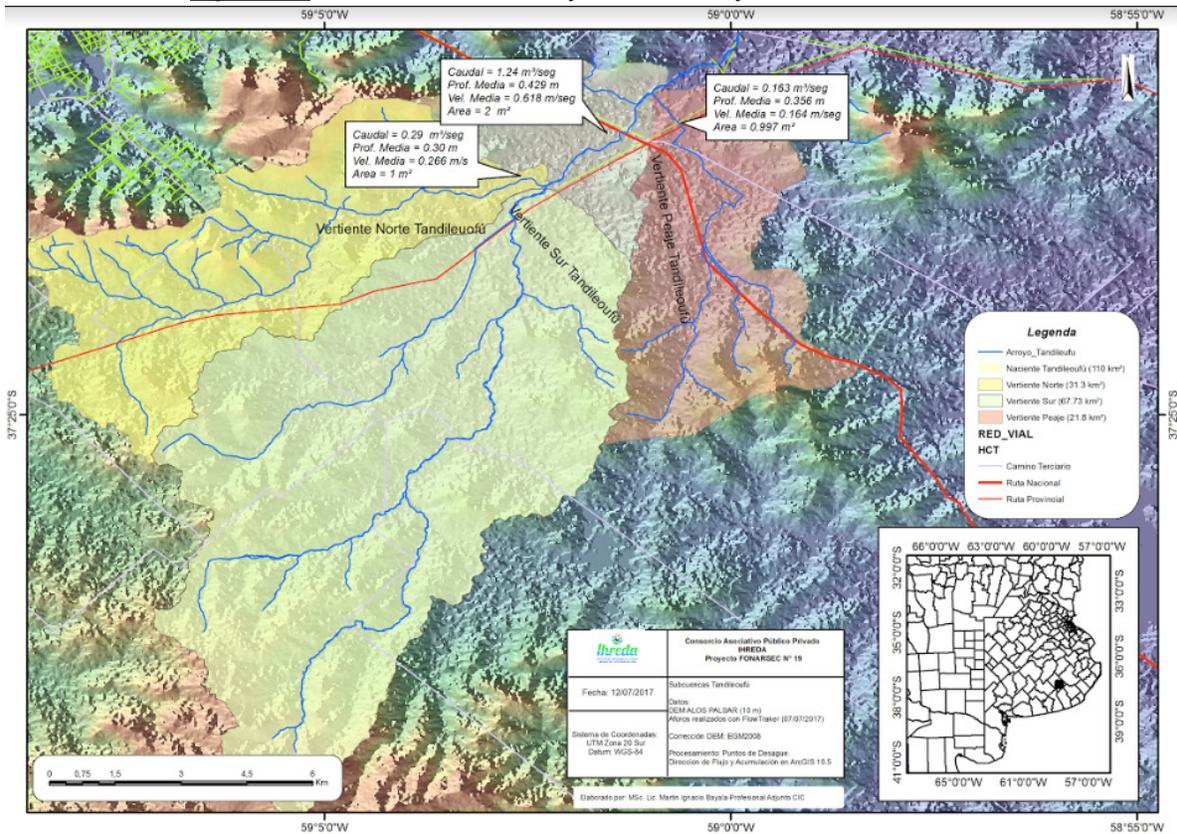
En cuanto a las **estaciones limnimétricas**, se están realizando los estudios necesarios para determinar la manera más eficiente de montar las estaciones, asegurando la protección ante el vandalismo y la estabilidad durante eventos de inundaciones. Como ejemplo, se presenta el caso del arroyo Tandileofú, ubicado en Tandil. En mayo de este año (2017), llovieron más de 150 mm en menos de 12 horas, y la ciudad se vio anegada en varias zonas. Este hecho fue, si bien perjudicial por las pérdidas que ocasionó en la ciudad, algo beneficioso a tener en cuenta en la infraestructura de la estación a instalar, y sirvió para evaluar la rapidez con que varía el nivel del agua en la respuesta de los arroyos de Tandil a lluvias de diferentes intensidades. Se reforzó aún más la necesidad del desarrollo de la red de monitoreo cuanto antes debido a la ineficiencia en la toma de datos, los cuales no están validados y esa incertidumbre genera dicho efecto en las posibles alertas. La red es necesaria para cumplir el objetivo de alertar a la población y al municipio en cuanto a las obras civiles que se necesitan urgentemente en la zona para contrarrestar las pérdidas que puedan producirse a futuro, tanto en los cascos urbanos como también en la productividad de los campos.

La estación de monitoreo del arroyo Tandileofú se instalará en las inmediaciones de la ruta N° 226. Luego de este evento, en el cual en este sitio el agua llegó a 1.25 m de altura, se están considerando otras cuestiones para mejorar la infraestructura de la estación. Se comenzaron a realizar aforos con periodicidad (Figura 11) para obtener una curva h-Q (altura de regleta vs caudal), y así poder conocer en profundidad la dinámica del sistema. También se definieron las sub-cuencas de este arroyo (Figura 12).

*Figura 11: Aforos realizados en el arroyo Tandileofú*



**Figura 12: Sub-cuencas del arroyo Tandileufú y caudales obtenidos\***



En cuanto al avance de la disposición de los sensores, en la Figura 13 se observa un prototipo de las **estaciones de monitoreo de balance de energía, y meteorológica**, y el logger fabricado por REDIMEC. En esta empresa se están realizando las pruebas piloto del funcionamiento de los sensores y los loggers. A su vez, la misma está realizando pruebas de comunicación desde las oficinas en el parque industrial mediante una antena repetidora que instalaron en Tandil en el cerro Las Ánimas.

**Figura 13: prototipo de EMM y EMBE y logger en REDIMEC**



## Comentarios finales

Se espera que al finalizar la instalación de todas las estaciones que conforman la red de monitoreo hidro-meteorológico de la vertiente sur del río Salado, se comience inmediatamente con la recolección de la información para conformar una base de datos hidrológicos. Estos contarán con la certificación del SMN, y a su vez, tendrán validez internacional ya que las estaciones cumplirán con los requisitos establecidos por la OMM, siendo estas consideradas de referencia para estaciones secundarias existentes en el área.

A partir de la conformación de la base de datos, analizando los mismos se podrá reconstruir lo que ha sucedido años anteriores, debido a la conservación del patrimonio hidrológico (puntos de estaciones freáticas-limnigráficas de la ADA) y prever situaciones futuras mediante el análisis y estudio de las variables que se obtengan. A partir de la información recolectada surgirán nuevos trabajos de investigación y desarrollo científico que involucren la caracterización del sistema de llanura analizado, generando de esta forma datos importantes que sirvan de sustento para la toma de decisiones políticas, de obras hidráulicas a futuro, sistemas de alerta para la población que se vea afectada por los eventos hidrológicos extremos y a su vez, un servicio brindado al productor agropecuario de modo que se reduzcan las pérdidas económicas ante la ocurrencia de dichos eventos.

Por parte de la empresa REDIMEC se planea desarrollar un departamento ambiental ofreciendo el prototipo de estaciones que surjan a partir del proyecto, tanto con el servicio de almacenamiento de datos en el logger como el de transmisión de los mismos. Este sería un producto de calidad con fuerte impacto en el desarrollo a nivel local, provincial y nacional, brindando un servicio técnico nacional, sustituyendo la necesidad de importar estos productos y permitiendo de esta manera brindar el servicio técnico (mantenimiento) necesario a quien disponga de las estaciones en el país.

A futuro se esperaría que la red se extienda (pasando a integrar una red de redes en el marco del proyecto hidro-ambiental de la provincia de Buenos Aires) y tenga un mayor alcance para así contar con una base de datos de la región para el conjunto de cuencas hidrológicas del centro-este de Argentina, y por qué no la aplicación de este tipo de red a otras zonas de interés ambiental del país y el exterior.

## Agradecimientos

Este proyecto es financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) a través de la herramienta FONARSEC (FITS MAyCC 19/2013). Los autores desean agradecer a las instituciones nacionales y provinciales, y a las empresas que han avalado el proyecto confiando en que la integración público-privada es una alternativa para responder a las necesidades de la población de la cuenca estudiada.

## Bibliografía

**Aliaga V. S., Ferrelli F. y Piccolo M. C.**, "Regionalization of climate over the Argentine Pampas" (2017), International Journal of Climatology, Royal Meteorological Society  
**Ameghino F.**, "Las sequias y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires" (1884) disponible en: <http://www.biblioteca.org.ar/>  
**Fattorelli S. y Fernández P.** "Diseño hidrológico" (2011), 2<sup>da</sup> edición, Edición digital, pp. 80-87. Fecha de consulta 19/05/17 a las 10:15 horas desde: [http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro\\_diseno\\_hidrologico\\_edicion\\_digital.pdf](http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf)  
**Guía de prácticas hidrológicas** "Adquisición de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones" (1994), Organización Meteorológica Mundial (OMM), OMM-N°168, 5<sup>ta</sup> edición, pp. 273-303

**Hart J. K. y Martinez K.**, “Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science?” (2006), Earth-Science reviews 78, pp. 177-191, Elsevier

**Scarpati O. E. y Capriolo A. D.**, “Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal” (2013), Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, ISSN 0188-4611, Num. 82, pp. 38-51.

**Suriano J. M. y Ferpozzi L. H.** “Inundaciones y sequías en la historia pampeana” (1993), Rev. De la Sociedad Rural de Jesús María, 77, pp. 20-24. Disponible en: [http://www.produccion-animal.com.ar/inundacion/09-inundaciones\\_sequia\\_historia\\_pampeana.pdf](http://www.produccion-animal.com.ar/inundacion/09-inundaciones_sequia_historia_pampeana.pdf)

**Usunoff E., Varni M., Weinzettel P. y Rivas R.**, “Hidrogeología de grandes llanuras: La Pampa húmeda Argentina” (1999), Hidrología Subterránea, Boletín Geológico y Minero. Vol. 110-4, pp 47-62