

## MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y EVALUACIÓN DE RIESGO EN LA CIUDAD DE TANDIL DESDE UNA GEOGRAFÍA APLICADA

María Lorena La Macchia  
CIG-IGEHCs-CONICET-UNCPBA  
[llamacchia@fch.unicen.edu.ar](mailto:llamacchia@fch.unicen.edu.ar)

### RESUMEN

El siguiente trabajo constituye un avance de la tesis de la maestría en Teledetección y SIG, la cual intenta profundizar y dar cuenta de los factores y procesos que intervienen en la modelización hidrodinámica hidráulica de una cuenca urbana extrayendo escenarios de riesgo de inundaciones y evaluación daños a partir de la simulación de eventos extremos desde una Geografía Aplicada. Las tecnologías de modelización simulan y analizan las consecuencias de un evento de inundación, evaluando y estimando los daños estructurales, no estructurales y las pérdidas económicas durante y post un evento extremo.

Como premisa central es necesario entender el sistema en su totalidad estudiando cómo la configuración territorial y expansión urbana de la ciudad genera impactos en los procesos físicos y en la dinámica del escurrimiento superficial y subsuperficial del agua.

La ciudad de Tandil ha evidenciado inundaciones y anegamientos de gran magnitud e intensidad, como la de noviembre de 1951, que determinaron la construcción y ejecución de distintas obras hidráulicas a partir de esa década.

El crecimiento urbano y el ritmo acelerado de la construcción residencial, han afectado la permeabilidad de los suelos y la disminución de la vegetación causando, por un lado, problemas en el escurrimiento natural de las aguas y en el aumento del tiempo de retención y captación en períodos de intensas precipitaciones. Por otro lado, ha sido urgente la necesidad de gestionar obras de infraestructura para garantizar un mejor funcionamiento de la red de drenaje.

El objetivo de este trabajo es exponer parte de la metodología de la investigación en curso para modelizar de manera dinámica los procesos físicos y urbanos intervinientes en el sistema. Para ello, se seleccionarán zonas testigo partiendo de los resultados derivados de la modelización hidrológica llevada a cabo con el programa AQUA II.

La simulación de escenarios variará según la topografía, la red de drenaje y el desarrollo y gestión de obras de infraestructura hidráulica, permitiendo evaluar las principales zonas de riesgo de inundación en la ciudad de Tandil.

**Palabras Clave:** Modelización hidrodinámica hidráulica - Riesgo – Geografía Aplicada- Tecnologías

### INTRODUCCIÓN

El espacio geográfico puede ser comprendido como la articulación dialéctica de la sociedad y la naturaleza, definida ésta como una realidad compleja. No es posible estudiar tal realidad

desde una disciplina particular, sino que requiere de un enfoque sistémico que ponga énfasis en la búsqueda de una mirada interdisciplinar.

Los estudios de riesgo han adquirido especial relevancia científica y tecnológica en las últimas tres décadas. Entre las distintas aproximaciones al concepto de riesgo, muchos autores como Maldonado (2013), Natenzon (1998) y Renn (1992) lo conciben, por un lado, como el resultado de la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad y, por otro, como la convergencia de la peligrosidad/amenaza y de la exposición/vulnerabilidad. Se entiende el riesgo como la probabilidad de que algo potencialmente “dañino” suceda, haciendo énfasis en una ecuación en la que se conjugan tanto la amenaza como la vulnerabilidad; la primera definida por la probabilidad de que el evento suceda o no, y la segunda, entendida desde la población que se encuentra expuesta a ese evento concreto (Carballo; Goldberg, 2014).

En esta línea de análisis, el riesgo debe ser explicado a partir de la comprensión y conjunción de los procesos políticos y económicos, como naturales y sociales, los cuales, constituyen procesos de ocupación y transformación del espacio que generan parte de los cambios que se desarrollan en la dinámica y configuración urbana. Rolando García (2006) define este abordaje como un sistema complejo, indagando en la pluralidad y multicausalidad de procesos, estructuras y escalas de análisis, que hacen de un problema o una situación de riesgo que pareciera ser simple, se convierta en complejo.

De esta manera el abordaje desde una Geografía Aplicada es central para entender la capacidad de carga y resiliencia de los ecosistemas urbanos, evitando modelos de ciudades difusas y fragmentadas en pos de construir ciudades más sostenibles, coherentes con el sistema natural y el proceso de expansión urbana de la ciudad.

## 1. ¿CÓMO SE DEFINE EL RIESGO?

Se puede afirmar que el término *riesgo* es ampliamente utilizado desde múltiples disciplinas. Posee una acepción propia para los geógrafos, ingenieros, economistas, epidemiólogos, sociólogos y psicólogos. En cada caso, se estudia un aspecto particular que define el peligro.

Perry y Montiel (1996, p.5) consideran que, si bien el concepto tiene múltiples dimensiones, ello no es un problema en sí, sino que lo convierte en una dificultad teórica el hecho de que los científicos no reconozcan las diferentes aristas del término y basen su trabajo en la suposición de que el riesgo es un concepto unidimensional.

Estos autores establecen dos tradiciones teóricas distintas que profundizan en el problema de la concepción de riesgo. La primera de estas corrientes es dominada por economistas y consiste en calcular la cantidad de riesgo. Desde este punto de vista, el riesgo es la propiedad de un evento. El objetivo es estimar la probabilidad y la magnitud del desastre teniendo en cuenta las características de un suceso histórico similar, por lo que el riesgo se calcula multiplicando la probabilidad de que ese evento ocurra por las consecuencias de este evento (basadas en sucesos pasados).

La segunda corriente ha sido desarrollada por sociólogos y psicólogos sociales. Este enfoque supone que el riesgo es un estado de percepción mental del individuo ante el peligro, por lo que es definido subjetivamente por la población afectada. En esta línea, el riesgo no es entendido sólo en términos de daño a la propiedad sino también de la interrupción del ritmo de la vida cotidiana de la población en general.

En este sentido, el riesgo debe ser entendido como un concepto multidimensional que puede ser abordado y definido desde una pluralidad de disciplinas.

Si analizamos la acepción del término según las líneas de investigación de distintos autores, podemos encontrar dos tipos de riesgos, de acuerdo a Hagget (1994), aquellos físico-naturales y aquellos en los cuales interviene la sociedad que ocasiona el desastre. Lo que separa uno de otro es la capacidad que la sociedad tiene para adaptarse o no a la *incertidumbre* que plantea el sistema físico-natural, entendiendo, en este caso, la importancia de la planificación territorial en cuanto a la *gestión del riesgo*.

Caputo y Herzer (1987, p.3) definen el riesgo como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno que se encuentra ligado a la capacidad de predecir y de ajustarse que tiene una sociedad determinada frente a un evento natural cíclico.

Natenzon (1995, p.7), define el riesgo como un resultado imprevisto que sucede como consecuencia de nuestras propias actividades o decisiones. El mismo existe cuando podemos cuantificar, cuando podemos colocar un número. Cuando no se puede establecer una probabilidad respecto a lo que va a ocurrir, ya no se tiene riesgo sino incertidumbre.

Valenzuela (1999) analiza el riesgo ambiental como la posibilidad de ocurrencia de daños a causa de fenómenos naturales y antrópicos sobre el medio y la población. La efectiva ocurrencia de estos daños sobre una población y territorio vulnerables y que exceden su capacidad de respuesta, rehabilitación y reconstrucción, constituyen un desastre; y este abordaje no puede desentenderse de la gestión ambiental y el ordenamiento territorial en forma integrada. Para Cardona (2001), el riesgo adquiere sentido cuando existe una probabilidad de ocurrencia o cuando se prevea, teniendo en cuenta las condiciones de vulnerabilidad. Es una medida de probabilidad que excede un nivel de consecuencias sociales, económicas o técnicas en un cierto sitio y un período de tiempo. Es decir, no sólo dependerá de la posibilidad de que se presenten eventos, sino de las condiciones de vulnerabilidad que faciliten que se desencadenen consecuencias o impactos en la comunidad. Siguiendo al autor, los desastres son eventos socio-ambientales cuya materialización es el resultado de la construcción social del riesgo.

En resumen, el hecho de que un evento o fenómeno se considere o no riesgo dependerá del lugar en donde se manifieste y su grado de vulnerabilidad. El que se considere o no amenaza dependerá del grado de probabilidad de su ocurrencia en esa comunidad. Y el que se convierta o no en desastre dependerá de la magnitud real con que efectivamente se manifieste el fenómeno y del nivel de vulnerabilidad de la comunidad.

Maldonado (2013, p.13) sostiene que el riesgo se define como el encuentro entre un evento y un sistema social o natural que es susceptible de ser dañado.

Las dimensiones del riesgo dadas por la amenaza y la vulnerabilidad se consideran centrales en su estudio. La amenaza se asume como algo sujeto a predicción, por lo que predominan las propuestas de soluciones técnicas orientadas a su manejo y control, cualquiera sea su origen. Desde la perspectiva economicista, las propuestas para su reducción derivan del análisis de la relación costo-beneficio, por lo que las aquéllas serán recomendadas siempre y cuando dicha relación sea favorable en términos de ganancia (Natenzon, 1995, p.5).

Para Carballo y Goldberg (2014, p.18), el riesgo es entendido como la probabilidad de que algo potencialmente “dañino” suceda; es parte de una ecuación en la que se conjugan la amenaza y la vulnerabilidad, la primera definida por la probabilidad de que el evento suceda o no y la segunda entendida desde la población que se encuentra expuesta a ese evento concreto.

A partir de lo expuesto, podemos evidenciar diversas posturas y perspectivas que nos permiten acercarnos a una definición de riesgo. En general, todas son válidas considerando

la mirada con la cual estemos abordando el problema, como así también el tipo de dimensión o variable que intentemos analizar.

### 1.1. Amenaza, riesgo y vulnerabilidad

La teoría social del riesgo está constituida por factores o elementos que son los que nos permiten estudiar la realidad. A su vez, estas dimensiones implican variables independientes y dependientes del sistema en su totalidad.

El concepto de *amenaza*, denominado también *peligrosidad*, se entiende como la probabilidad de ocurrencia o amenaza potencial de un evento, mientras que el *riesgo* se define como el encuentro entre este evento y un sistema social o natural que es susceptible de ser dañado.

Ahora bien, cuando intentamos definir *vulnerabilidad* existen diferencias considerando los métodos aplicados para su análisis y las posibles políticas de las cuales derivan. El concepto involucra varios términos, principalmente el de *exposición*, asociada a las construcciones materiales y acciones de la población sobre el territorio. Otros conceptos se refieren a la *capacidad de captación, resiliencia y adaptación*. Todos ellos devienen conceptos importantes a la hora de analizar la vulnerabilidad social dentro del sistema y se convierten en un juego dialéctico que permite analizar y estudiar los procesos políticos, económicos y sociales en una escala global.

Sarewitz *et al.* 2003, citados por Maldonado y Cóccaro (2011), afirman que la comprensión y la disminución de la vulnerabilidad no precisan predicciones exactas en relación a la incidencia de eventos, ya que, si bien la vulnerabilidad no está divorciada de la probabilidad, su manejo no depende de la predicción de eventos futuros. Consideran que el predominio de políticas de manejo del riesgo que priman en el enfoque técnico se traduce en beneficios políticos, porque éstos son más fáciles de capturar que aquellas políticas integrales tendientes a la reducción de la vulnerabilidad social, cuyos resultados deben pensarse en el mediano y largo plazo.

De esta manera, la vulnerabilidad funciona como un concepto sintetizador de las relaciones estructurales globales, existentes en la sociedad con los niveles locales, donde se realizan las situaciones y los eventos de riesgo.

Para Natenzon (1998, p.9) la vulnerabilidad está referida a las estructuras socio-económicas y, a partir de ella, podemos caracterizar la situación social antecedente al evento catastrófico.

Herzer (1990, p.5), sostiene que la vulnerabilidad comprende el estado de los grupos sociales que se puede comprobar, entendido como un proceso de acumulación de factores socioeconómicos, ambientales, habitacionales, sanitarios, nutricionales e incluso psicosociales. Muchas veces, como afirma Cardona (2001), se magnifica el papel de la vulnerabilidad dejando de lado el estudio de las amenazas, e incluso se llega al extremo de tratar la vulnerabilidad como sinónimo de riesgo.

Por último, debemos considerar el término *incertidumbre* que, según Natenzon (1998), está directamente relacionado al ámbito de la toma de decisiones que dependen de los estudios y los intereses de los actores políticos. Ésta adquiere un rol que es fundamental para analizar el proceso de construcción del riesgo, ya que se refiere a la toma de decisiones en materia de políticas de planificación urbana y ordenación en el espacio urbano e intraurbano. Esto implica tener en cuenta, por un lado, el contexto político y socioeconómico y, por otro, las estrategias de intervención en escala global-local.

Luego de analizar los elementos que constituyen el riesgo, debemos establecer las variables o los patrones que presenta la ocurrencia de un evento en particular.

Distintos autores británicos y estadounidenses, como los geógrafos citados por Peter Haggett (1994), como Ian Burton; Robert Kates y Gilbert White, afirman que los riesgos ocurren en muchas áreas que experimentan cambios sociales y ambientales. Los autores han analizado las variables que permiten distinguir los patrones que identifican un evento.

En América Latina, Perry y Montiel, Hilda Herzer, Claudia Natenzon, entre otros, también miden las mismas variables teniendo en cuenta el tipo de fenómeno. Éstas están definidas por:

- La magnitud del acontecimiento definido a partir de la intensidad

Las cuatro siguientes están relacionadas con el tiempo:

- La frecuencia o recurrencia con que ocurren,
- La duración del fenómeno,
- La velocidad,
- La temporalidad en términos de regularidad y aleatoriedad.

Las dos últimas son específicamente geográficas:

- La extensión del área sobre la superficie del territorio,
- El grado de concentración o dispersión espacial dentro del área.

Es importante para el estudio de riesgos calcular un período de retorno, es decir, el intervalo medio dentro del que un evento de una magnitud específica puede esperarse que ocurra.

Además de estas variables, el análisis de la causalidad de los procesos derivada del medio construido es central, entendido éste como la configuración de los usos de suelo y las modificaciones en los procesos naturales (escurrimiento, topografía y cobertura vegetal). Asimismo, se suman a estos procesos los aspectos de esas configuraciones considerando las infraestructuras, las redes de servicios públicos, la producción agropecuaria e industrial, la forestación y la sociedad inserta en el territorio.

Como conclusión, los cuatro elementos que definen el riesgo constituyen visiones parciales que coexisten todo el tiempo, cada una de ellas, vincula a actores sociales diferentes. Cualquier tipo de abordaje requiere trabajar con las cuatro visiones y, a partir de ello, considerar el antes, el durante y el después del evento.

## **2. GEOGRAFÍA, TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y MODELIZACIÓN**

La Geografía ha desarrollado a lo largo de su tradición diferentes maneras de ver la realidad, definidas como los paradigmas del pensamiento geográfico. Su consideración como ciencia aplicada a fines del siglo XX parte de distintas perspectivas estrechamente ligadas con el foco situado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estas perspectivas según Buzai (2011) son la ecológica, corológica y sistémica que permitieron proporcionar su relación con la Geografía Aplicada. La primera, considera a la ciencia que estudia la relación del hombre y su medio (sociedad-naturaleza); la segunda plantea que su objeto de estudio es la región, entendida como la diferenciación de espacios sobre la superficie terrestre. Y la tercera, define a la Geografía desde un punto de vista sistémico como la ciencia que estudia las leyes que rigen las pautas de distribución espacial.

En la última década del siglo XX, muchos de los conceptos estudiados en la tradición geográfica son revalorizados surgiendo nuevas corrientes y asimismo incorporando nuevas variables de análisis. Conceptos fundamentales de naturaleza espacial como el de localización, distribución, asociación, interacción, y evolución espacial constituyen nuevos campos de conocimientos insertos dentro de una Geografía Aplicada, donde los SIG no son considerados solo instrumentos técnicos sino que se presentan como herramientas teóricas que permiten actuar y pensar espacialmente.

Si intentáramos definir qué es un modelo se podría decir que el mismo pretende reproducir algunas de las características de un sistema real y se construyen para predecir propiedades del objeto real, por ello se define como una representación simplificada de la realidad.

Un concepto ligado al modelo es el de modelización, entendido como el proceso de producción de esos modelos, incluyendo la acción de aquellos que lo producen (Linares 2012: 18).

Buzai (2011) sostiene que si se define la modelización como estructura de organización de datos en el interior de un Sistema de Información Geográfica, esta estructura es estática y depende de la forma en que serán organizados y almacenados digitalmente las bases de datos raster y vectorial. En cambio, si se la entiende como proceso, lleva a un modelado dinámico de datos espaciales que permite, mediante simulaciones, obtener configuraciones espaciales futuras. Esta última definición conlleva la importancia de la dimensión temporal.

En planificación urbana y regional, el estudio desde los modelos es de gran importancia, ya que en el análisis y dinámica del espacio urbano, no es posible manipular los objetos para encontrar una mejor disposición o para descubrir sus propiedades naturales. Las escalas, análisis de costos y tiempo también obstaculizan las investigaciones porque suelen ser demasiado grandes para implementar análisis repetitivos. En este sentido es que a través de la construcción de modelos, los investigadores encuentran una posibilidad de representar la estructura y funciones del sistema urbano como una alternativa para la comprensión y explicación de este fenómeno en la realidad (Linares, 2012: 19).

Los modelos se construyen con el fin de contribuir a la solución de un problema concreto a partir de hacer predicciones, analizar tendencias de evolución para determinadas magnitudes que permita hacer previsiones más que predicciones y emplearlos como instrumentos para analizar los distintos modos de comportamiento que puede tener un sistema (Linares, 2012: 22).

Uno de los principales problemas que se plantean al trabajar con ellos es la necesidad de seleccionar de forma adecuada la escala de análisis o de trabajo. Ello dependerá del objetivo y problema de investigación.

Haciendo énfasis en el proceso de construcción de los modelos, se pueden distinguir distintas fases:

- determinar los objetivos y el problema a resolver en el mundo real;
- seleccionar la base teórica adecuada y el diseño de un marco metodológico que aborde el problema planteado. En esta fase se debe tener en cuenta que a falta de una teoría sólida, el modelo establece ciertos supuestos o hipótesis que servirán de fundamento teórico;
- formular el modelo en un lenguaje matemático. En esta etapa la información sobre la situación del mundo real tiene que ser extraída y traducida a ecuaciones matemáticas;
- implementar el modelo en un programa informático que permita ajustar y calibrar su funcionamiento desde el punto de vista de las variables utilizadas y los valores numéricos proporcionados a los parámetros del modelo;

- poner a prueba los resultados haciendo énfasis en la validez y la sensibilidad para observar si se comporta razonablemente cuando se realizan cambios en algunas de las condiciones y evaluar, si el modelo se asemeja a la situación analizada en el mundo real.

La validación y adecuación de los modelos constituye una actividad permanente en cualquier tipo de investigación que se basa en simulaciones. La debilidad de ellos reside en aceptar cierto grado necesario de invalidez, ya que se omiten algunas variables de la realidad que, según el criterio del investigador, no serían trascendentales para explicar la situación en el mundo real.

### **3. ASPECTOS METODOLÓGICOS: MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA HIDRÁULICA Y DRENAJE URBANO**

En los últimos diez años, los modelos hidrológicos han sido cada vez más utilizados para evaluar, comprender y analizar la dinámica de escurrimiento que involucran a los sistemas de cuencas, posibilitando la predicción de escenarios a corto y mediano plazo a partir de la simulación de eventos de diferentes intensidades e implicancias socioespaciales.

Haciendo énfasis en la búsqueda del estado de arte en la temática, se pudieron encontrar trabajos diversos provenientes, en general, desde las ciencias más duras, como la ingeniería hidráulica, agrimensura y herramientas aplicadas desde las ciencias de la computación o vinculando las disciplinas anteriores.

La diversidad de trabajos se reduce, por un lado, a la propuesta de modelos de simulación hidrológica para distintos tipos de relieve y al aporte de los modelos digitales de elevación (MDE) extrayendo parámetros morfométricos para incorporarlos a las modelizaciones.

La gran variedad de las tecnologías de aplicación giran en torno al procesamiento de la información espacial existente, con el objetivo de simular o modelar determinados aspectos del terreno, interpretar eventos concretos y determinar áreas vulnerables o de riesgo dentro de las tecnologías de geoprocésamiento disponibles en los SIG.

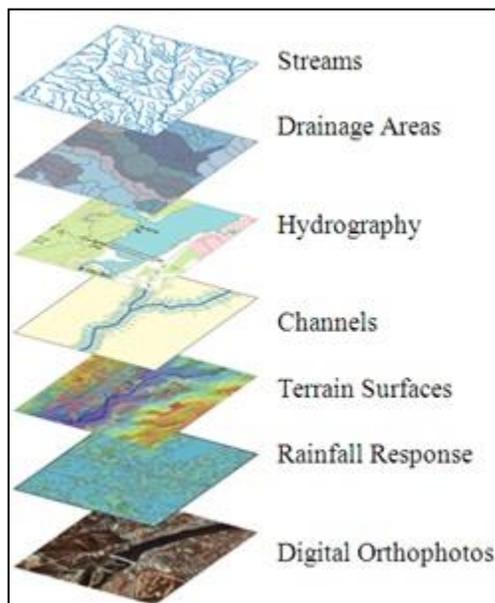
Siguiendo esta línea de análisis, es posible construir un conjunto de modelos derivados, elaborados a partir de la información contenida explícita o implícitamente en el MDE. Los más sencillos pueden construirse exclusivamente con la información del MDE y reflejan características morfológicas simples (pendiente, curvas de nivel, orientación, curvatura, rugosidad, etc.). A partir de la incorporación de información auxiliar es posible elaborar otros modelos más complejos, como por ejemplo, definir las propiedades de la red de drenaje (dirección de flujo y flujo acumulado), la escorrentía superficial y delimitar las cuencas y subcuencas hidrográficas utilizando conjuntamente la descripción morfológica del terreno y las simulaciones numéricas de procesos físicos. No se debe olvidar el aporte de los recursos derivados de la Teledetección, que constituyen herramientas de gran aplicabilidad e importancia para análisis temporal y espacial de la hidrología superficial y los eventos de inundaciones, como por ejemplo el procesamiento de imágenes satelitales y los estudios multitemporales.

Carlos Scioli (2009) plantea que existen distintos tipos de modelos de escurrimiento de llanura o bajo relieve: los modelos agregados, semi-distribuidos y distribuidos. La diferencia entre ellos radica en la escala de trabajo en la que operan, a nivel de cuenca, subcuencas o matriz/grilla. Si bien cada uno de ellos posee ventajas y desventajas son escasos los modelos disponibles para simular el escurrimiento en áreas de llanura. Por ello su utilización dependerá de los objetivos que se propongan en el desarrollo de cada investigación y el nivel de abstracciones aceptadas como “coherentes” de las simulaciones resultantes.

Existen distintos programas que permiten trabajar, integrar información derivada de diferentes fuentes y obtener resultados de gran alcance y potencialidad. Por un lado, podemos utilizar los llamados no comerciales como el HMS (*Hydrologic Modeling System*) (HEC, 2006), el HEC-RAS (*River Analysis System*) (HEC, 2002), el HEC-FIA (*Flood Impact Analysis*), el SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) SWMM (*Storm Water Management Model*), el GSSHA (*Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis*), el ATHYS (*Atelier HYdrologique Spatialisé*), el TopModel (*TOPography based hydrological MODEL*), por citar algunos. Por otro, aquellos con licencia comercial como el ArcGIS 10.2 que posee módulos específicos con herramientas y rutinas integradas. Por último, debemos tener cuenta los que permiten actuar como medios para obtener un determinado resultado, como por ejemplo, el ENVI (licencia). Son utilizados en etapas donde se requiere la conversión de formatos y la compatibilidad de archivos para ingresarlos dentro de una plataforma de trabajo. En esta línea, podemos mencionar los libres, como el IDRISI, el QuantumGIS y el GVSig. Si consideramos el desarrollo de modelos, podemos encontrar distintas aplicaciones que se encuentran insertas dentro de los programas o en algunos casos se incorporan como extensiones en los programas anteriormente mencionados (Figura 1).

Otro tipo de trabajos posibles de rescatar son aquellos más afines a las disciplinas sociales que trabajan, evalúan y analizan el riesgo en las ciudades en pos de construir ciudades más sostenibles en materia de planificación territorial. Estas investigaciones refieren al diagnóstico del sistema natural actual de las ciudades medias, a los actores y a la multicausalidad de procesos que explican o que atraviesan de manera transversal la complejidad del problema y a la confección y elaboración de cartas de riesgo hídrico para generar estrategias de intervención respecto a su posterior mitigación, gestión y evaluación.

Figura 1. Datos de entrada de los modelos



Fuente. Arc Hydro: GIS for Water Resources

Es importante destacar que no se encontraron en la bibliografía aportes pertinentes relacionados a modelizaciones hidrológicas desarrolladas en diferentes escalas desde la Geografía Aplicada. Por ello el desafío de esta investigación. Este trabajo en curso consistirá, por un lado, en poder estudiar de forma integrada el sistema natural regional sobre el cual se emplaza la ciudad, como su topografía, geomorfología, variabilidad climática y la configuración territorial en la distribución de los usos del suelo. Por otro lado será central analizar su infraestructura y red de drenaje (conductos, ramales, entubamientos con sus caudales máximos) y los aspectos técnicos (gestión de obras, infraestructuras y proyectos de pavimentación) para analizar la dinámica y velocidad del escurrimiento y movimiento multidireccional del agua durante el desarrollo de un evento.

El ciclo hidrológico, como sistema, será central a la hora de analizar los procesos físicos que intervienen en la modelización hidrodinámica. Este sistema se define como físico porque pertenece al mundo real; secuencial, porque consta de una entrada, salida y un medio de trabajo (materia, energía, información) que pasa a través del sistema; a su vez, es dinámico y complejo, porque recibe ciertas entradas cuantitativas y actúa de manera controlada, bajo restricciones definidas, para producir una serie de salidas cuantitativas. De esta manera poder distinguir y diferenciar, a partir de las ganancias y pérdidas de escurrimiento, su fase superficial, de cauces, de reservorios y subsuperficial a nivel de cuencas serán de gran aporte en las simulaciones para integrarlas como variables y parámetros que regularán el flujo del agua dentro las simulaciones resultantes.

Los modelos que se utilizarán serán el HEC-RAS para simular los eventos y posibles crecidas y se recurrirá a un modelo complementario de evaluación de daños para valorar y/o estimar obras y apoyar la toma de decisiones, el HEC-FIA, ambos desarrollados por el Centro de Ingeniería Hidrológica (*HEC-Hydrologic Engineering Center*) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers*).

En este sentido se tendrán en cuenta variables que refieren a la vulnerabilidad y exposición de la población, como así también se respaldará mediante fotografías aéreas e imágenes históricas del crecimiento urbano y expansión residencial de la ciudad, proyecciones futuras a partir de las modelizaciones disponibles, información periodística y registros fotográficos de los eventos ocurridos durante el año 2017.

Es importante destacar que al incrementar la escala, la complejidad y abstracción de los modelos son mucho mayores, como así también los resultados obtenidos de las simulaciones. Por ello, se seleccionarán zonas testigo extraídas de los resultados de la investigación de grado.

Respecto al análisis de los eventos, se trabajará sobre datos históricos de precipitaciones, se construirán curvas IDF e hietogramas con base en las lluvias registradas durante el año 2017. Las variables que se incorporarán serán la intensidad, duración, frecuencia y recurrencia.

Los resultados de estos escenarios permitirán evaluar el peso de las variables y factores a lo largo de las modelizaciones, optimizar la búsqueda de patrones de distribución espacial y validar las predicciones de riesgo y vulnerabilidad teniendo en cuenta el costo ambiental, económico y social.

#### **4. CONTEXTO Y CONFIGURACIÓN TERRITORIAL DE LA CIUDAD DE TANDIL**

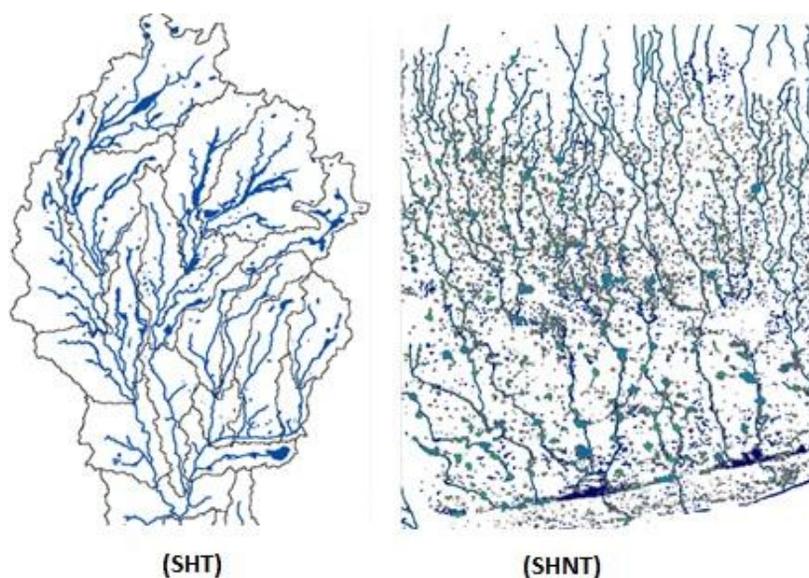
Una de las características más comunes de nuestra llanura pampeana es que sus superficies no tienen pendiente o esta es mínima. El terreno se encuentra cubierto de

depresiones y no contiene un sistema de drenaje natural adecuadamente desarrollado. La energía potencial del sistema se encuentra determinada por la diferencia de altura entre los puntos más altos de la cuenca y la sección de desagüe, la cual es muy baja (Dalponte *et al.*, 2007: 3).

En la llanura el volumen de agua acumulado en las depresiones sobrepasa en muchos casos la ecuación de balance hídrico. El agua que excede la capacidad de almacenamiento de las depresiones se mueve como una lámina, muy lentamente sobre la superficie.

En este sentido algunos autores como Carlos Scioli (2009) quien cita a Fertonani (1978) estableciendo una diferenciación entre dos tipos de sistemas: los Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT) y Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHNT), tal como se muestra en la figura 2. Los primeros se caracterizan por ser sistemas donde la estructura escurrimiento está conformada por escurrimientos unidimensionales, organizados y jerarquizados derivados de los cauces principales y sus tributarios. El agua escurre en forma más o menos ordenada hasta llevar los excedentes fuera del sistema. Los segundos, por lo general, no tienen una superficie de aporte definida, no puede fijarse un único punto de descarga y no cuentan con componentes unidimensionales, organizados y jerarquizados que conformen su red de drenaje. El agua escurre en forma desordenada, indefinida e imprevisible, característicos en zonas de llanura.

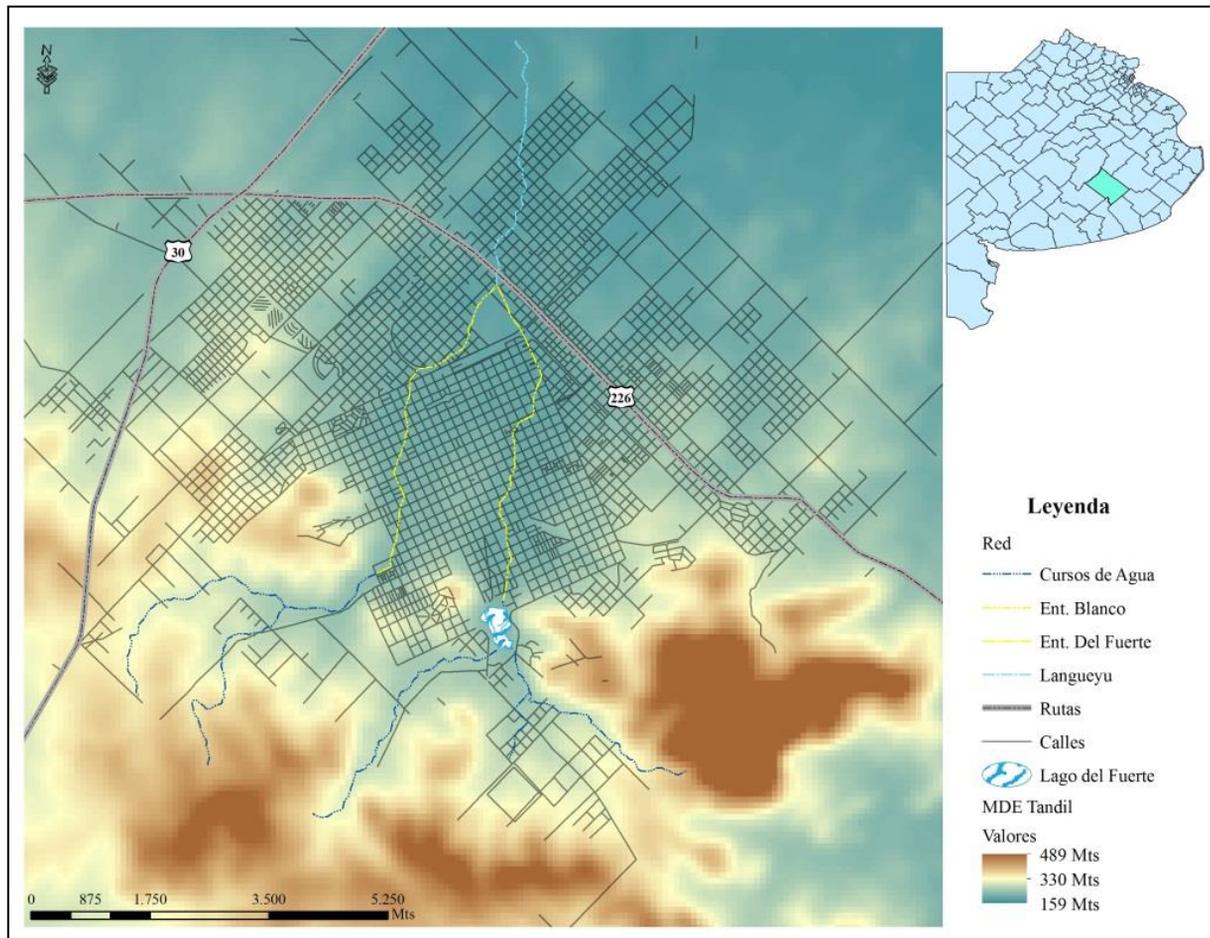
Figura 2. Sistema Hidrológico Típico y Sistema Hidrológico No Típico



Fuente. Scioli, 2009

La ciudad de Tandil se localiza al sudeste de la provincia de Buenos Aires y conforma el sector central de las Sierras Septentrionales de la provincia. En la figura 3, se observa que la ciudad se encuentra emplazada sobre un cordón de valles que descienden desde las Sierras de Tandil (sistema de Tandilia), hacia el sur y oeste, una transición hacia el piedemonte serrano, ubicado hacia el norte y noreste, con pendientes más suaves y la zona de llanura, hacia al norte del área urbana.

Figura 3. Contexto y localización de la ciudad de Tandil

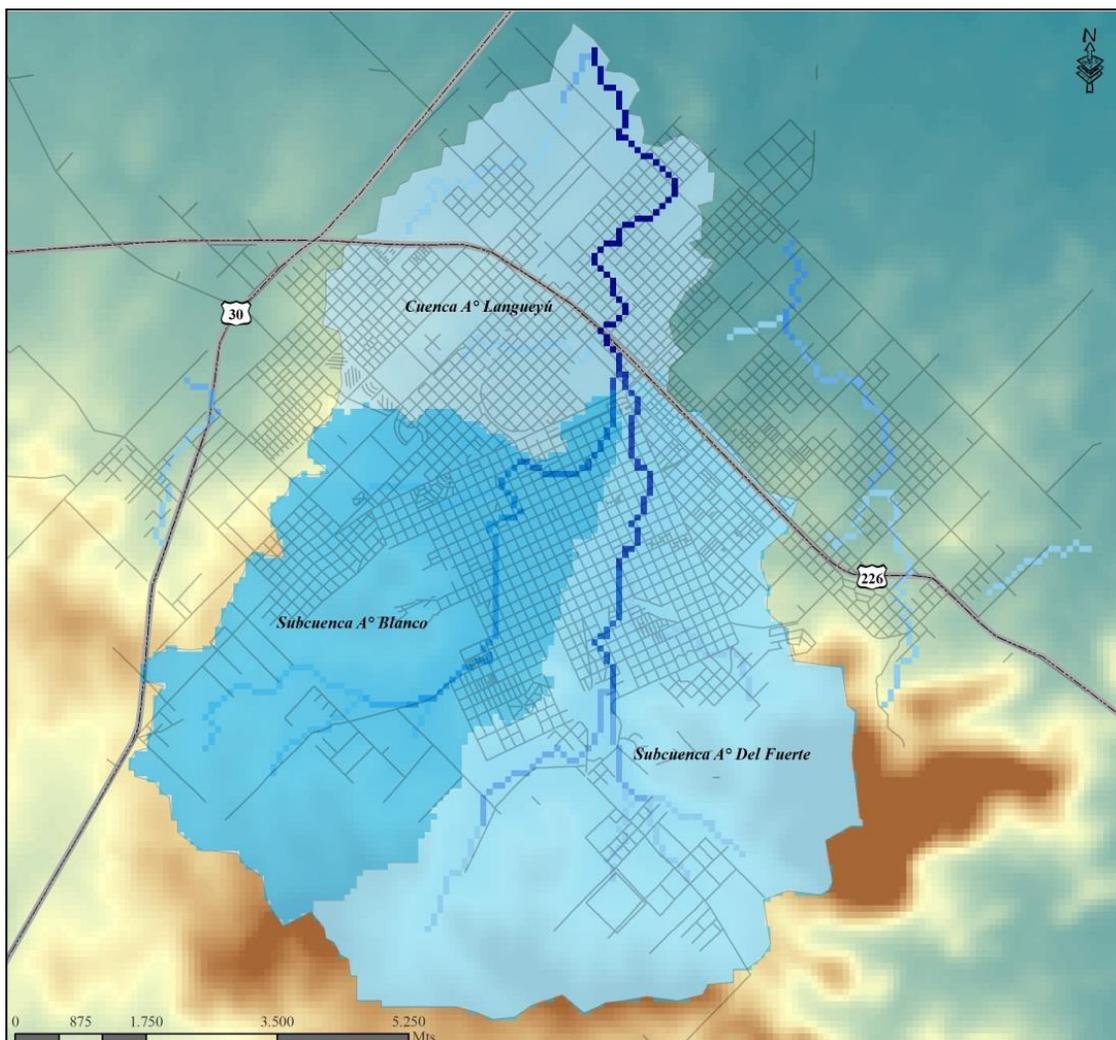


Fuente. Elaboración propia

Originalmente la ciudad contó con un límite natural de expansión hacia el sur-suroeste delimitado por las sierras de Tandil, que, en la última década se han convertido en un instrumento de valorización y especulación. Este límite marcaba la configuración territorial del tejido urbano estableciendo contrastes en la distribución espacial de la población hacia el centro y sur, decreciendo gradualmente la estructura de clases hacia la periferia norte-noreste junto al deterioro de los precios inmobiliarios y calidad de los servicios colectivos básicos (Linares, 2007).

La cuenca más importante es la del sistema Langueyú que atraviesa toda el área urbana de la ciudad. Está integrada por dos subcuencas: el arroyo Del Fuerte y Blanco (figura 4).

Figura 4. Sistema Langueyú



Fuente. Elaboración propia

Históricamente, el espacio urbano de la ciudad se configuró bajo distintos ejes de expansión y crecimiento: espontáneos, planificados e inducidos. Según afirman Lanet *al.* (2010) estos ejes, debido a las escasas y dispersas reglamentaciones de orden provincial y municipal permitieron una intensificación del crecimiento espontáneo dejando que las leyes del mercado regulen el proceso de expansión residencial dentro de la ciudad. Esta situación ha derivado a una falta de acompañamiento en el desarrollo de políticas de planificación y gestión territorial, primando la construcción de un espacio más productivo, dinámico e integrado.

La ciudad ha vivido diversas situaciones de peligro a partir de eventos de gran magnitud e intensidad que provocaron inundaciones y anegamientos importantes, los cuales, determinaron la construcción y ejecución de varias obras hidráulicas.

Los antecedentes de la inundación de 1951 que afectaron a gran parte del área urbana y suburbana de la ciudad, determinaron la construcción en el año 1958 del dique regulador denominado Dique del Fuerte. Su función es regular los caudales de crecida que bajan torrencialmente de las sierras y disminuir la saturación a través de sus veinte bocas hacia el

entubamiento. El mismo fue inaugurado en 1962 conformando el Lago del Fuerte. Los eventos producidos en el año 1980 garantizaron la factibilidad de su funcionamiento.

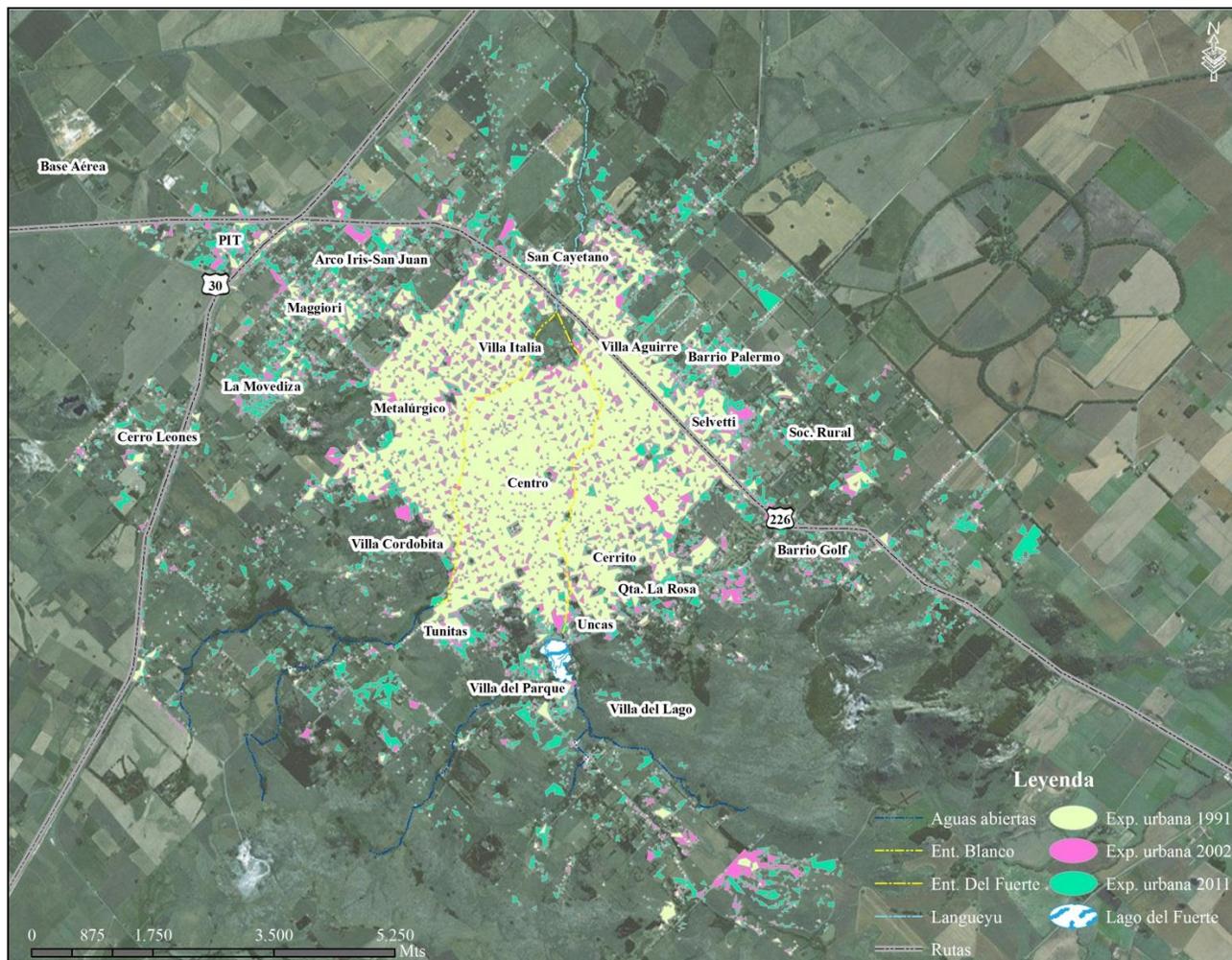
En la década del setenta se sucedió el entubamiento del arroyo Del Fuerte y entre 1980 y 1981 se culminó el entubamiento del arroyo Blanco, ambos colectores que dan origen al arroyo Langueyú, con el fin de regular y desacelerar la velocidad del escurrimiento durante los períodos de precipitaciones de características recurrentes. Estas obras hidráulicas han dado resultados satisfactorios, pero en la actualidad la infraestructura de la red se encuentra colapsada considerando su capacidad de retención y captación de agua en eventos de gran intensidad, sumado a su estado actual, ya que no cuenta con obras de mantenimiento, limpieza y mejoras para su eficaz funcionamiento. Esta situación se complejiza teniendo en cuenta el aumento de la impermeabilidad y posibilidad de infiltración de los suelos, la disminución de espacios verdes y el proceso de expansión urbana y construcción residencial de una ciudad intermedia que crece y se expande hacia el noroeste-noreste y sur.

En el año 2012, hacia el sureste de la ciudad se inauguró el dique seco denominado Ramal H que mediante contención y descarga permite regular los picos de crecidas en épocas de intensas lluvias. Si bien solucionó problemas de anegamiento en los accesos y barrios aledaños, el conflicto continúa en otras zonas aguas abajo de la presa y aquellas coincidentes con los ejes de expansión urbana y residencial.

El aumento desacelerado de los ritmos de urbanización y la construcción sobre el faldeo serrano generan conflictos ambientales que ponen en riesgo su fragilidad e integridad teniendo en cuenta la demanda, la accesibilidad y la calidad de los servicios colectivos básicos como la red de agua, cloacas, infraestructura vial e iluminación. En términos hidrológicos su urbanización pone en peligro el régimen hídrico desviando cauces, afectando la velocidad del escurrimiento e impermeabilización de los suelos por la falta de espacios verdes y, a su vez, generando la coexistencia de distintos usos de suelo en una zona que posee restricciones y prohibiciones según el Plan de Desarrollo Territorial (PDT).

Actualmente, según se observa en la figura 5, la ciudad se ha extendido hacia el Sur hasta cubrir el piedemonte de las sierras, hacia el Oeste y Este, cruzando los valles de los arroyos y, hacia el Norte y Este, por lo que el crecimiento urbano espontáneo se identifica hacia los ejes Norte y Este de la ciudad (Lan et al., 2010).

Figura 5. Expansión urbana de la ciudad de Tandil. Período 1991-2002-2011.



Fuente. Elaboración propia<sup>1</sup>

## 5. ZONAS TESTIGO PARA LA MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y EVALUACIÓN DE RIESGO

Los resultados arribados en la tesis de grado, a partir de las modelizaciones obtenidas mediante la utilización del programa AQUA II<sup>2</sup> fueron satisfactorios para un primer análisis del problema, teniendo en cuenta la escala de trabajo utilizada en la predicción de zonas potencialmente inundables, ya que es necesario considerar que al incrementar su escala de análisis, es apropiado aumentar el nivel de abstracción en los resultados.

<sup>1</sup> Esta figura fue elaborada a partir de los primeros resultados de la metodología aplicada en: Picone, N; Linares, S. (2014). Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. Revista Universitaria de Geografía. (1-2). pp 77-96.

<sup>2</sup> Programa desarrollado por el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA-UNCPBA) para modelizar el proceso de escurrimiento/escorrentía en terrenos de llanura El equipo de trabajo involucra a los investigadores: D. Dalponte, P. Rinaldi (PLADEMA-ISISTAN-CICPBA) G. Cazenave, E. Usunoff, L. Vives, M.Varni, (IHLLA-CICPBA) M. Venere y A. Clause (CNEA-CONICET).

Este modelo permitió definir los procesos de precipitación e infiltración y ambos integrarlos dentro de un modelo de escurrimiento superficial.

La detección del peligro de anegamiento en la ciudad se determinó mediante la elaboración de distintos escenarios de simulación. A partir de la extracción de los parámetros morfométricos del estudio del relieve que determinan la velocidad y sentido del escurrimiento superficial del agua, se incorporaron las restricciones derivadas del comportamiento de la red de infraestructura pluvial. En este sentido, se reasignaron los valores de los píxeles del Modelo Digital de Elevación (MDE) SRTM de 90 metros mediante la asignación de valores de profundidad en aquellas zonas donde el terreno era afectado por el entubamiento (conductos principales), recorrido de ramales (Arroyo Blanco y Del Fuerte) y alcantarillas (comúnmente denominadas bocas de tormenta), como así también en el comportamiento del Dique del Fuerte, el Ramal H y el Arroyo Langueyú, tratando de establecer un mayor o menor "costo" de escurrimiento durante la simulación.

Los eventos que se simularon se seleccionaron a partir del registro de lluvias del período 2011/2012 obtenido por los 10 pluviómetros que se encuentran distribuidos espacialmente en el territorio y los datos derivados de la estación meteorológica Tandil-AERO.<sup>3</sup>

En base a la intensidad de las precipitaciones según la duración del evento, se determinaron porcentajes de lluvia en función de las fracciones de tiempo y, de esa manera, se estructuró la intensidad de precipitaciones por hora según los valores promedio, dando como resultado variaciones en el nivel de anegamiento de agua que escurre sobre la distribución de las celdas del terreno.

La figura 6 muestra la síntesis del peligro de anegamiento de la ciudad construido a partir de la simulación del evento ocurrido el 18/02/2012. En este evento se registró que llovieron en dos horas 47,6 mm y 25 mm. Para complementar el análisis de los resultados obtenidos, además de la topografía y las restricciones derivadas de red de drenaje e infraestructura pluvial de la ciudad, se superpusieron el ferrocarril y vías de acceso y las manchas de expansión urbana correspondientes a los años 1991, 2002 y 2011.

---

<sup>3</sup> La base de datos fue proporcionada por la Dra. Natasha Picone en: Picone, N. (2014) "Clima urbano de la ciudad de Tandil". Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Turismo - UNS. 147 pp.

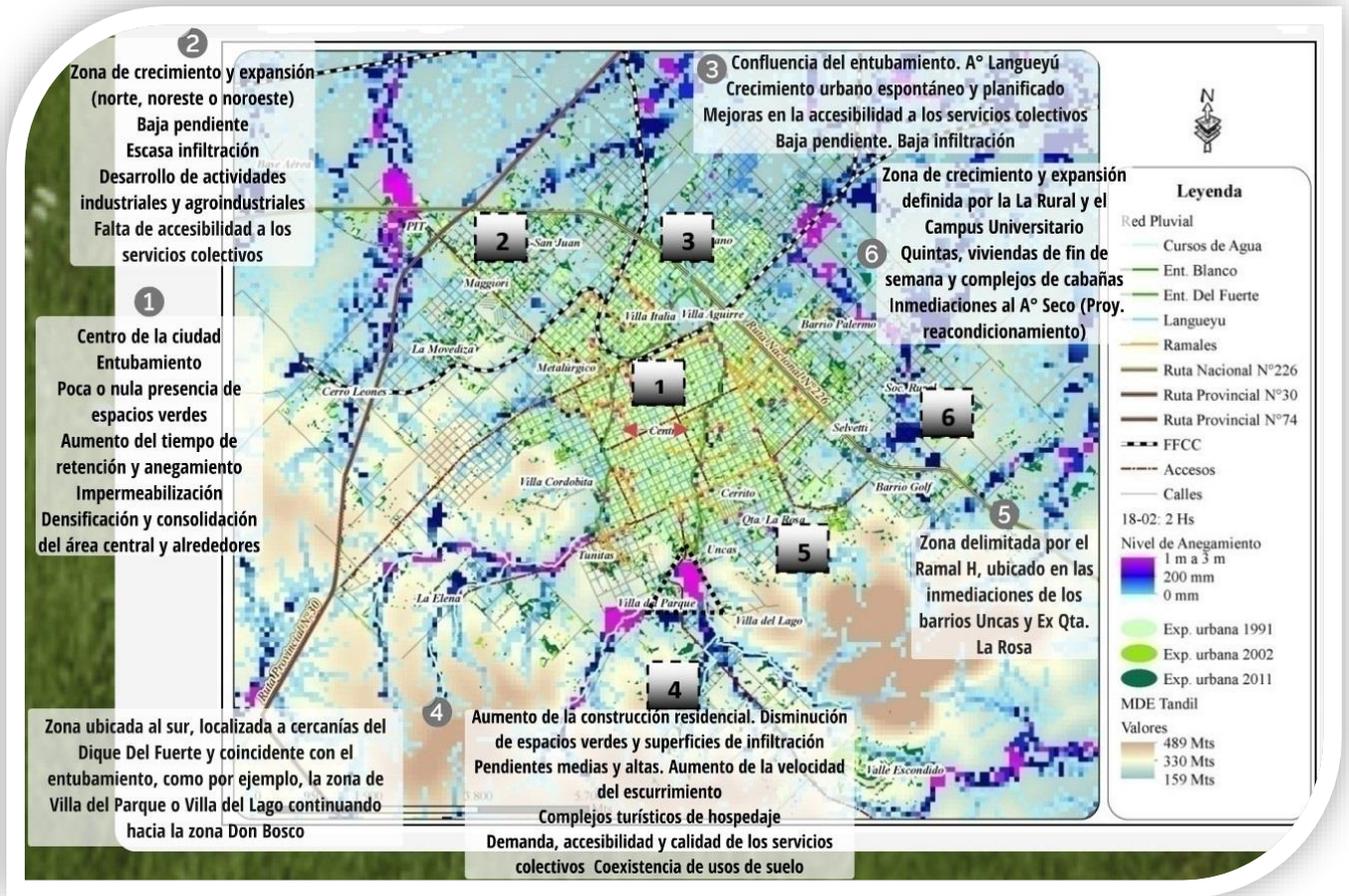


Figura 6. Mapa síntesis del peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados, sería interesante poder integrar en un modelo hidrológico-hidráulico los procesos físicos y urbanos otorgando mayores restricciones y pesos ponderados a cada una de las variables, teniendo en cuenta el proceso de expansión urbana y crecimiento de la ciudad, la normativa de planificación territorial, la consideración y precisión de los procesos físicos que intervienen en el ciclo del agua y la toma de decisiones para mitigar, evaluar y disminuir daños, por ejemplo, mediante el desarrollo de medidas estructurales y semiestructurales. La selección de zonas testigo que resultarían interesantes de poder modelizar y predecir escenarios futuros estarían definidas por<sup>4</sup>:

1. una zona o dos del área urbana de la ciudad que sea atravesada por uno de los entubamientos del arroyo Blanco o Del Fuerte;
2. una zona o dos coincidentes con áreas de crecimiento y expansión, como por ejemplo, al norte, noreste o noroeste;

<sup>4</sup> La selección de zonas testigo se encuentran referenciadas en el mapa síntesis mediante la misma simbología adoptada.

3. una zona localizada sobre la confluencia del entubamiento hacia el arroyo Langueyú;
4. una zona ubicada al sur de la ciudad, con diferentes características topográficas y de usos de suelo, localizada a cercanías del Dique Del Fuerte y coincidente con el final del entubamiento, como por ejemplo, la zona de Villa del Parque o Villa del Lago continuando hacia la zona Don Bosco;
5. una zona delimitada por el Ramal H, ubicado en las inmediaciones de los barrios Uncas y Ex Quinta La Rosa;
6. una zona de actual crecimiento y expansión definida por la zona de La Rural y el Campus Universitario, en inmediaciones del arroyo Seco (Proyecto de reacondicionamiento).

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

La determinación de zonas de peligro de inundaciones y evaluación de riesgo constituye una gran contribución desde una mirada aplicada de la geografía y en lo que respecta a la simulación hidrodinámica hidráulica, ya que permite intervenir en la toma de decisiones y la gestión de políticas de planificación y desarrollo urbano bajo distintas acciones, medidas y propuestas.

Algunas de ellas partirán, por un lado, del estudio del sistema natural y de su fragilidad ambiental haciendo énfasis en medidas que permitan desacelerar la velocidad del escurrimiento. Para ello, es fundamental conocer en profundidad el sistema de drenaje de cuencas sobre el cual se emplaza la ciudad. En una siguiente etapa de la investigación en curso, se llevarán a cabo posibles predicciones sobre lo que ocurriría si se conservaran los pulmones de manzana o si se densificara la superficie cubierta por espacios verdes, favoreciendo la infiltración y el escurrimiento durante el desarrollo de un evento. También cabría preguntarse qué sucedería si incrementáramos las restricciones a la construcción residencial en zonas de riesgo, según el plan de ordenamiento territorial de la ciudad (PDT).

Por otro lado, es sumamente interesante simular escenarios teniendo en cuenta el desarrollo de obras de infraestructura o medidas tanto semiestructurales como estructurales como por ejemplo el desarrollo de obras de mantenimiento y mejoras, la ampliación de la red de conductos, ramales y sumideros, canalizaciones o la construcción de nueva infraestructura para evitar la saturación y la capacidad de captación de agua durante los eventos de precipitación.

Para concluir, es fundamental responder interrogantes o validar hipótesis a partir de la presentación de estos escenarios futuros, ya que permiten conciliar propuestas y diagramar medidas a mediano y largo plazo desde una visión interdisciplinaria de una geografía aplicada, con el objetivo de construir ciudades más sostenibles y no difusas o fragmentadas, pensando en la multicausalidad de los procesos que intervienen en la configuración territorial de la ciudad.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Buzai, G. (2007) Dilemas de la relación Geografía-SIG entre la disciplina, la interdisciplina y la transdisciplina. *GeoFocus-Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información*

- Geográfica (Ed.). Núm.7. pp.5-7. Recuperado de [http://geofocus.rediris.es/2007/Editorial2\\_2007.\(pdf\)](http://geofocus.rediris.es/2007/Editorial2_2007.(pdf)). (13/11/2014)
- Buzai, G.; Baxendale, C.A. (2011) Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 1: Perspectiva científica / Temáticas de base raster. Lugar Editorial. Buenos Aires. 304 pp.
- Caputo, M.G; Herzer, H. (1987). Reflexiones sobre el manejo de las inundaciones y su incorporación a las políticas de desarrollo regional. Revista de Ciencias Sociales: Desarrollo Económico. Vol. 27.10 pp.
- Carballo, T.; Goldberg, S. (2014) Comunidad e información ambiental del riesgo. Las inundaciones y el Rio Luján. Buenos Aires: Editorial Dunken.165 pp.
- Cardona, O. (2001). Vulnerabilidad y Riesgo desde una perspectiva holística. Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Barcelona. pp. 99-134.
- Dalponete, D.; Rinaldi, P. (2003) AQUA II: Modelo Numérico para la simulación de inundaciones en llanuras. IHLLA-UNCPBA. Buenos Aires. 77 pp.
- Dalponete, D.; Rinaldi, P.; Cazenave, G.; Usunoff, E.; Vives, L.; Varni, M.; Venere, M.; Clause, A. (2007a) A validated fast algorithm for simulation of flooding events in plains. RevistaWileyInterScience. Hydrological Process. Vol. 21. N°8. Pp. 1115–1124. Recuperado de [http://www.researchgate.net/publication/230408147\\_\(pdf\)](http://www.researchgate.net/publication/230408147_(pdf)). (20/08/2014)
- Fajardo, L.; Entraigas, I. Scioli, C. (2017) Aplicaciones hidrológicas del Modelo digital de elevación operacional en la zona serrana del arroyo del Azul. XXVI Congreso Nacional del Agua. CONAGUA. Córdoba. Argentina. 9 pp.
- García, R. (2006) Sistemas complejos: conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Barcelona: Editorial Gedisa. 200 pp.
- Haggett, P. (1994). Geografía. Una síntesis moderna. Universidad de Bristol. Barcelona. Ediciones Omega S.A. pp 20-27.
- Herzer, H. (1990). Los desastres no son tan naturales como parecen. Medio ambiente y urbanización. IIED. N° 3º. Buenos Aires. pp 3-10.
- Jacinto, G.; Guerrero, E.; Coria, D. (2007) Historia ambiental del manejo de los Recursos Hídricos en la ciudad de Tandil. Abordaje preliminar.6ta. Biental del Coloquio de Transformaciones Territoriales. Escenarios prospectivos acerca del desarrollo del territorio. Una reflexión estratégica. Santa Fe, Argentina. 11 pp.
- Lan, D.; Linares, S.; Di Nucci, J.; López Pons, M. (2010) La lógica de la organización espacial en la Ciudad de TANDIL. (ELIAS, Denise; SPOSITO, M. Encarnação B.; SOARES, Beatriz R. Org.) Agentes Econômicos e Reestruturação Urbana e Regional: Tandil e Uberlândia. São Paulo. Editora Expressão Popular. pp. 29-155.
- La Macchia, M.L (2015) Modelización y análisis espacial del drenaje urbano de la ciudad de Tandil mediante Tecnologías de la información Geográfica. Tesis de licenciatura en Geografía. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 90 pp.
- La Macchia, M.L (2016) Simulación hidrológica y peligro de anegamiento en la ciudad de Tandil: Aportes desde las Tecnologías de la Información Geográfica. 1eras Jornadas de Hábitat y Ambiente (IHAM). Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. 24 al 26 de agosto de 2016. Mar del Plata. ISBN 978-987-544-768-4.
- Linares, S. (2012) Análisis y Modelización de la Segregación Socioespacial en Ciudades Medias Bonaerenses mediante Sistemas de Información Geográfica: Olavarría, Pergamino Y Tandil

- (1991 - 2001). Tesis de doctorado de Geografía. Departamento de Geografía y Turismo. UNS. Bahía Blanca. Bs.As. 301 pp
- Maldonado, G; Cocco, J. M. (2011). Esquema teórico para el estudio de la vulnerabilidad socio-territorial a inundaciones en ámbitos rurales. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 52(2). pp. 81-100.
- Maldonado, G. (2013) Sobre los distintos abordajes al estudio del riesgo y su dimensión ética. *Revista Reflexiones Geográficas* N° 14. Universidad Nacional de Río Cuarto. pp 66-77.
- Natenzon, C. (1995). Catástrofes naturales, riesgo e incertidumbre. Serie documentos e informes de investigación. N° 197. FLACSO. Buenos Aires. 21 pp.
- Natenzon, C. (1998) Riesgo, vulnerabilidad e incertidumbre. Desastres por inundaciones en Argentina. PIRNA. Facultad de Filosofía y Letras. UBA. 16 pp.
- Perry, R.; Montiel, M. (1996). Conceptualizando riesgo en para desastres sociales. Predicciones, Pronósticos, Alertas y Respuestas Sociales. *Revista semestral de la red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina (La Red)*. N° 6. Año 4. 9 pp. Recuperado de <http://www.desenredando.org/public/revistas/dys/rdys06/dys6-1.0-crpds.pdf>. (10/03/2014).
- Picone, N.; Linares, S. (2014) Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*. (1-2). pp 77-96.
- Picone, N. (2014) Clima urbano de la ciudad de Tandil. Tesis de Doctorado en Geografía. Departamento de Geografía y Turismo. UNS. 147 pp.
- Plan de desarrollo territorial de la ciudad de Tandil (PDT). Recuperado de <http://www.tandil.gov.ar/>
- Renn, O. (1992) Concepts of Risk: A Classification. Krinsky, S. y Golding, D. (Ed). *Social Theories of Risk*. PRAEGER. Londres. pp. 53-79.
- Scioli, C. (2009) Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: Implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. Maestría en Recursos Hídricos en zonas de llanura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional del Rosario. 127 pp
- Valenzuela, M.C. (1999). Amenazas de origen climático que pueden desencadenar situaciones de riesgo en la ciudad de Río Cuarto, Argentina. En *CRONIA Revista de Investigación de la Facultad de Ciencias Humanas*, Año 3, Vol. 3, N° 2, Universidad Nacional de Río Cuarto. 20 pp.