



Aplicación del modelo SHALL en los sistemas hidrológicos de las lagunas don Tomás y bajo Giuliani (La Pampa, Argentina) para la evaluación de impactos provocados por efluentes y escurrimientos

Erik Zimmermann¹ y Juan Carlos Mecca²

¹ Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA. UNR) - Riobamba 245 bis - (2000) Rosario, Argentina. CONICET.

² Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Pampa. Gerente de A. Pot. y Saneam. Urbano Coop. Reg. Electric., Obras y Serv. Gral. Pico Ltda. Calle 9 y 110 (6360) CC 114 - General Pico. La Pampa. Argentina.

Mail de contacto: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se describen las tareas realizadas para la implementación del modelo de simulación hidrológica-hidrodinámica cuasi-3D SHALL en los sistemas de las lagunas don Tomás y bajo Giuliani, que reciben los efluentes de la ciudad de Santa Rosa (La Pampa, Argentina). La primera recibe descargas pluviales urbanas. La segunda recibe aguas superficiales y subterráneas de su propia cuenca, del trasvase por bombeo de la laguna don Tomás, del sistema pluvial sudeste de Santa Rosa y de líquidos cloacales depurados en plantas de tratamiento. Sus salidas naturales son por evaporación e infiltración. Con el aumento poblacional, existe un mayor volumen de efluentes, generando incrementos del niveles importantes.

El modelo se calibró con mediciones de niveles, entradas y salidas (período 2006-2007), estimándose los escurrimientos superficiales mensuales mediante balance hidrológico. Se realizaron corridas de explotación en el período 2007-2030, suponiendo un escenario futuro de aumento de precipitaciones y escurrimientos ante un escenario de calentamiento global, junto a incrementos en los efluentes debido al aumento poblacional. Los resultados alcanzados indican que el aumento del nivel del Bajo Giuliani se incrementaría en aproximadamente 17 m para el 2030. Su desborde afectaría la RN N° 35, en el año 2012 y la RP N° 14, en el 2009.

Palabras clave: modelación hidrológica, sistemas de llanura, lagunas don Tomás y Giuliani.

ABSTRACT

The tasks performed to implement the hydrological-hydrodynamic simulation quasi-3D model SHALL to the don Tomás and Giuliani closed systems, are described. Don Tomás lagoon receive urban stormwater discharges of Santa Rosa city (La Pampa, Argentina). Giuliani lagoon receive runoff and groundwater of their basin, transfer by pumping of the don Tomás lagoon, stormwater discharges and sewage effluents of Santa Rosa. Its outputs are natural evaporation and infiltration. With the increasing population, there is a greater volume of effluent, generating significant increases in its levels. The model was calibrated with measurements of levels, inputs and outputs (2006-2007) of the lagoons. Monthly runoff were estimated by water balance. Runs were performed operating the model in the period 2007-2030, assuming a future scenario of increased precipitation and runoff under a global warming scenario join to increases in the effluent due to population growth. The results obtained indicate a increasing of the Giuliani's levels by approximately 17 m by 2030. This levels could affect the national road N° 35, in 2012 and provincial road No. 14 in 2009.

Keywords: hydrological model, flatland systems, don Tomas and Giuliani lagoons.

Introducción

La explotación de un recurso natural debe estar acompañada de un análisis de los efectos sobre ecosistemas y su sostenimiento en el largo plazo. En las cercanías de la ciudad de Santa Rosa (provincia de La Pampa), existen dos

grandes cuencas naturales cerradas: la Laguna Don Tomás y el Bajo Giuliani.

La laguna Don Tomás recibe el aporte del sistema de desagües pluviales de la ciudad y aguas de precipitaciones de su cuenca de aporte, que en términos generales nunca ha cambiado de tamaño. Sí, ha cambiado el escurrimiento, como consecuencia de actividad antrópica,

principalmente la impermeabilización a consecuencia de la expansión urbana. Asimismo, cuando el nivel de la misma es tal que impide el correcto desagüe de los canales pluviales, sus excedentes son bombeados hacia la laguna del Bajo Giuliani.

La laguna del Bajo Giuliani recibe aguas del escurrimiento de su propia cuenca, del trasvase por bombeo de la Laguna Don Tomás (cuando el nivel de ésta se haya desbordado), del sistema de desagües pluviales sudeste de la ciudad, de los líquidos cloacales depurados en las Plantas de Tratamiento Norte y Sur y además, funciona como descarga subterránea de los acuíferos aledaños. Al ser un sistema hidrológicamente cerrado, las salidas naturales están constituidas por evaporación e infiltración.

Con el aumento de la población, el caudal de los líquidos cloacales se ha ido acrecentando, debido al mayor consumo de agua potable y, consecuentemente, ha generado un aumento paulatino del nivel de la laguna Giuliani.

El crecimiento vegetativo de la población de Santa Rosa genera mayor demanda de agua potable, que podrá ser satisfecha mediante el acueducto del Río Colorado a la red de agua potable de la ciudad. Ello, producirá un incremento de los líquidos cloacales tratados y crudos que derivan al Bajo. De acuerdo a estudios existentes, utilizados en la elaboración del Plan Director de la ciudad, la capacidad del Bajo Giuliani para servir de descarga a los líquidos señalados podría resultar insuficiente para la condición del año 2030 (Consortio EIH, 1986).

En este trabajo, se proponen como objetivos: (a) formular conceptualmente el comportamiento hidrológico de los sistemas de las Lagunas Don Tomás y Giuliani, (b) simular el comportamiento hidrológico mediante constitución y calibración del modelo matemático hidrológico-hidráulico SHALL (Zimmermann y Riccardi, 2000) y (c) proponer un escenario futuro estimando la evolución de los niveles en la laguna del Bajo Giuliani y área de influencia mediante la explotación del modelo (Mecca, 2008).

Se considera que el empleo del modelo propuesto es adecuado a los fines perseguidos ya que el mismo es capaz de simular el comportamiento en el largo plazo de los flujos y almacenamientos de componentes superficial y subterráneo. El modelo, a grandes rasgos discretiza el dominio espacial en celdas interconectadas sobre las cuales se cuantifican flujos y balances verticales de agua. El mismo se describe sintéticamente a continuación (Zimmermann y Riccardi, 2010).

Flujos verticales de agua y vapor

Los volúmenes interceptados por la vegetación son simulados mediante un almacenamiento temporal limitado por una capacidad máxima de intercepción, la cual depende del tipo de cultivo. La precipitación total es interceptada por un porcentaje de cobertura que depende del área cultivada por celda, del tipo de cultivo y de su grado de desarrollo. El almacenamiento superficial se recarga con la precipitación efectiva, es decir, aquella que alcanza la superficie topográfica. Una celda constituye la unidad de discretización espacial. El almacenamiento superficial se considera como una capacidad máxima a abastecer una vez satisfecha la intercepción.

El modelo de flujo en zona no saturada (ZNS) está basado en la ecuación de Richards, la que se resuelve para estimar la distribución de humedad y los montos de agua intercambiados con la atmósfera y el acuífero. Solamente está contemplado el flujo en la dirección vertical. En el planteo se considera la humedad volumétrica, la conductividad hidráulica no saturada, el coeficiente de difusividad del medio, la curva de retención del suelo y un término fuente-sumidero que, en el caso de suelos cultivados, representa la tasa de extracción de agua por las raíces de las plantas.

El medio poroso no saturado es representado en forma discreta mediante un conjunto de celdas que se extienden verticalmente desde la superficie hasta el nivel freático. Se ha propuesto un esquema numérico de tipo explícito en diferencias finitas para resolver las ecuaciones diferenciales. El esquema es centrado en el espacio y progresivo en el tiempo. En los bordes de celdas se evalúan los flujos de intercambio y en los centros de celdas se estiman las humedades.

Como condiciones de contorno, en superficie y en el nivel freático, se plantea la resolución de las ecuaciones anteriores, con algunas de las incógnitas conocidas.

En superficie, durante un período lluvioso, el volumen infiltrado por intervalo temporal está limitado por la intensidad de lluvia caída más los volúmenes almacenados superficialmente.

Para los períodos entre lluvias, el primer almacenador que satisface la demanda de evaporación potencial es la lámina interceptada y en segundo término la lámina almacenada superficialmente (si existen). Si los montos almacenados en superficie no alcanzan para cubrir la demanda se extrae agua del suelo por transpiración vegetal. El modelo limita la tasa de evapotranspiración máxima, mediante una función de extracción $0 < \beta(\Psi) < 1$ dependiente del potencial matricial. Se asume una distribución

homogénea de las raíces en el suelo. Para la condición de borde inferior se consideran las celdas incluidas en la capa acuífera con humedad de saturación. El conjunto de celdas saturadas depende del nivel freático, y éste es actualizado dinámicamente en el modelo general.

Para las curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica en el modelo se contemplan las relaciones de Brooks-Corey. Los lazos de histéresis entre secado y mojadura no se tienen en cuenta.

Flujos horizontales de agua

Los modelos de flujos horizontales, tanto el superficial como el subterráneo, se basan en esquemas de celdas (Cunge 1975). Estos esquemas permiten simular el movimiento multidireccional mediante el intercambio de flujo entre celdas con cualquier dirección contenida en el plano, con leyes de intercambio unidimensionales. La estructuración en esquemas de celdas permite la discretización del dominio espacial en "capas" de celdas homólogas, superficiales y subterráneas, vinculadas por los modelos de flujos verticales, previamente descriptos. Las ecuaciones gobernantes consideradas para el movimiento de flujo en ambos modelos son de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La ecuación de continuidad se plantea para cada celda, donde se verifica que la variación de almacenamiento interno equivale a los flujos de intercambio entre las celdas adyacentes laterales, superiores e inferiores (Cunge, 1975).

El flujo superficial puede ser propagado mediante un espectro de leyes propuestas que permiten la simulación de tránsito por ríos, canales, valles de inundación, calles urbanas y redes de conductos cerrados. Se contemplan las vinculaciones entre las celdas basadas en diferentes aproximaciones de la ecuación hidrodinámica (cinemática, difusiva, cuasidinámica y dinámica completa). También se contemplan vinculaciones físicas entre celdas tales como vertederos, alcantarillas, puentes, embocaduras, contracciones, expansiones, etc. (Riccardi 1994, 1997a, 1997b; Riccardi et al, 1995).

Para el flujo subterráneo se plantea la ecuación de continuidad de la misma forma que la correspondiente a flujo superficial, salvo que se considera la porosidad del medio. El modelo evalúa el intercambio de caudal entre celdas de acuerdo con la formulación de Darcy para flujo

uniforme en medio poroso saturado (Riccardi y Zimmermann, 1999).

Para la resolución numérica de ambos modelos es adecuado el uso de un esquema implícito. La resolución numérica se realiza mediante un algoritmo matricial basado en el método de Gauss-Seidel, previa reducción de la matriz mediante eliminación de elementos nulos.

Las condiciones de borde posibles de imponer son: (a) Cota de Agua en función del tiempo, $z(t)$; (b) Caudal en función del tiempo, $Q(t)$ y (c) Relación cota - caudal, $Q = f(z)$. Asimismo el modelo requiere la especificación de las alturas de agua en todas las celdas en el tiempo inicial.

Puesta en operación del modelo

El área bajo estudio se enmarca en un rectángulo de aproximadamente 19 km de base por 22 km de altura, donde se encuentran las lagunas del Bajo Giuliani y Don Tomás (Fig. 1).

El Bajo Giuliani es una depresión endorreica, de forma alargada con el eje del sistema de rumbo general oeste - suroeste, este - noroeste. Presenta una pendiente meridional levemente mayor al 2 % y una septentrional de aproximadamente 0,6 %. Está formado por suelos de características arenosos y arenolimosos, producto de la deposición eólica y se asientan sobre un manto de suelo calcáreo. Este manto de tosca calcárea del tipo dura y semi-dura, se encuentra localizado entre los 0,50 y 1,80 metros de profundidad, siendo su espesor promedio de 0,80 a 1,00 m. En los niveles inferiores presentan granulometría más fina. Las sales totales son del orden del 1%. El sistema hidrogeológico presenta curvas equipotenciales que convergen centripetamente hacia el bajo Giuliani que actúa como zona de descarga del acuífero freático. El acuífero es multicapa, funcionando como libre en la parte superior y confinado en la parte inferior.

La laguna Don Tomás es una depresión natural, que constituye una geoforma tipo plato playo. Es elongada en el sentido Nor-Noroeste y Este-Sureste, y se halla circundada por una suave pendiente meridional de 0,15 % de gradiente y una septentrional de inclinación mayor, aproximadamente 0,5 %. Los suelos son de textura abierta, de características preponderantemente limo arenosos incompresibles, de buena percolación, cuya compacidad se incrementa a medida que se avanza en profundidad. Las sales totales se estiman en menos del 0,1%, salvo puntos

aislados, con intercambio catiónico apropiado y cantidades moderadas de fósforo y potasio.

La ciudad de Santa Rosa se encuentra ubicada en una región de transición climática, con un clima continental, templado con estaciones definidas, donde se diferencian verano e invierno. La temperatura media anual es de 16°C, y la humedad relativa media es aproximadamente del 60 %. El promedio histórico de precipitaciones (período 1911-2006) alcanzó los 638 mm anuales, mientras que en las dos últimas décadas el promedio de precipitaciones alcanzó 732 mm anuales. Los promedios pluviométricos descienden rápidamente hacia el oeste, pues se produce el pasaje de la pampa húmeda a la gran llanura seca del centro del país. En las últimas décadas, se han modificado sustancialmente los patrones pluviométricos de la región, hay una tendencia de crecimiento lineal que refleja una evolución hacia un escenario más húmedo en los próximos años.

Para la implementación del modelo se procesó la información recopilada, constituida por datos climatológicos, geológicos, hidráulicos e hidrológicos. Inicialmente, se digitalizaron curvas de nivel correspondientes al área de estudio, se calcularon las curvas cota-volumen de ambas lagunas y se delimitan las cuencas superficiales de aporte hacia ellas.

Con imágenes de satélites correspondientes a los años 2001 a 2006, se analizó la evolución del nivel de la laguna ubicada en el bajo Giuliani. Asimismo, se determinó la cobertura vegetal de las cuencas superficiales, mediante clasificación multiestacional, contemplando las firmas espectrales entre las distintas cubiertas (Tabla 1).

Se analizó estadísticamente la serie de precipitaciones mensuales histórica registradas en Santa Rosa, desde el año 1911. Se determinaron áreas de influencia de tres pluviómetros instalados en la sede del Servicio Meteorológico Nacional (Aeropuerto), Centro de Abastecimiento Sur de agua potable y Plantas de Tratamiento Sur (Bajo Giuliani).

Se georeferenciaron pozos de agua potable registrados en la Dirección Provincial de Aguas, ubicados dentro de la cuenca subterránea. En función de ellos, se describieron las propiedades del acuífero freático.

Se hicieron numerosas tareas de campo con el fin de determinar niveles de lagunas, realizar ensayos de infiltración de doble anillo, censo de pozos subterráneos que fueron referenciados mediante GPS, clasificación supervisada de coberturas estimadas mediante imágenes satelitales, instalación de

pluviómetros. Se realizaron nivelaciones de escalas, rutas y superficie freática.

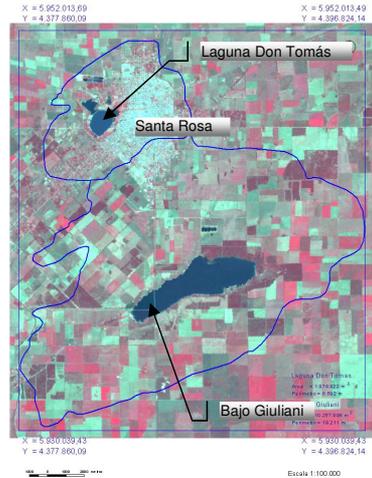


Fig. 1. Área de estudio y cuencas de aporte

Tabla 1. Tipos y áreas de cobertura

Cubierta	Sup. (has)	% del total
Suelo desnudo	7473	33,6
Rastrojos	2967	13,3
Monte	2137	9,6
Cultivos de verano	2859	12,8
Cultivos de invierno	1813	8,1
Pasturas	2401	10,8
Urbano	2603	11,8
Total	22253	100

Se discretizaron los dominios superficial y subterráneo en topología de celdas de 1 km de lado. La Fig. 2 presenta la esquematización correspondiente con el dominio interno de modelación superficial, al dominio subterráneo se le debió adicionar 86 celdas de contorno.

Las características geométricas del acuífero fueron determinadas basándose en información estratigráfica de la zona provista por la Dirección de Aguas de la Provincia de La Pampa y curvas isopiécicas construidas a partir de censo de pozos. Si bien el censo fue realizado mediante el Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), año 1975, el patrón de la configuración de las curvas se estima que no ha cambiado

sustancialmente. Esto permite estimar las áreas de recarga y descarga y las divisorias, principalmente.

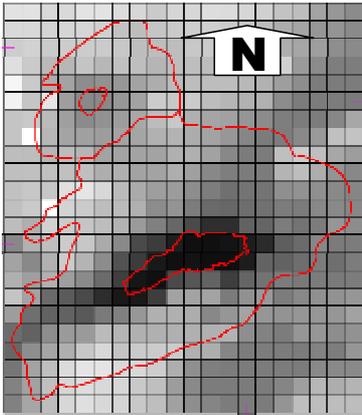


Fig. 2. Topología adoptada para las celdas internas, junto a modelo digital de terreno en escala de grises.

La zona modelada en detalle comprendió unos 464 km², aunque se extendió a unos 940 km² para considerar las condiciones de borde, correspondientes a la cuenca subterránea. La transmisividad de cada vinculación entre celdas y el coeficiente de almacenamiento de cada celda, se adoptaron en base a las curvas de isovalores construidas con los datos de pozos de bombeo, relevados y detallados por la Dirección de Aguas (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de ensayos de bombeo

	Promedio	Desvío estándar
Profundidad	27.5 m	12.1 m
Caudal bombeado	10.6 m ³ /h	8.6 m ³ /h
Caudal específico	0.6 m ³ /h.m	0.5 m ³ /h/m
Coef. de almacenamiento	0.04	0.03
Transmisividad	13.2 m ² /d	12.4m ² /d
Conductividad hidráulica	0.74 m/d	0.87m/d

Las profundidades máximas del acuífero freático oscilan en los 50 m, en el sector de la cabecera de cuenca, por lo que se adoptó una discretización espacial Δz de 1,0 m. La zona no saturada (ZNS) se modeló con una profundidad

máxima de 60 m totalizando 60 nodos verticales por cada celda interna de superficie y/o subterránea. La discretización temporal (Δt) fue adoptada en 100 segundos para el modelo de flujos durante eventos lluviosos y de 360 segundos para el modelo de flujos en evapotranspiración. Estos valores de Δt garantizan condiciones de estabilidad según se ha analizado previamente, aunque se ha incorporado una rutina en el modelo que evalúa el cumplimiento de la condición de Courant (que debe verificarse en los esquemas numéricos explícitos) en cada instante de cálculo.

Para la caracterización de los suelos del lugar se consideraron las cartas de suelo publicadas por INTA (Cano, 1980). Allí se clasifican los mismos, considerando tres áreas geomorfológicamente diferenciadas: (a) loma, (b) pendiente y (c) bajo. En función de las composiciones texturales, granulometrías, pH, capacidad de intercambio catiónico y densidades de cada sector, publicadas en las cartas de suelo por el INTA, se utilizaron las funciones de pedotransferencia de Puckett, Rawls y Brakensiek, obteniéndose los parámetros del modelo de Brooks-Corey para cada sector (Tabla 3).

Tabla 3 Parámetros del Modelo de Brooks-Corey

Área	K _s cm/h	θ _r adim.	θ _s adim.	Ψ _c Cm	λ adim.
Loma	0,63	0,08	0,5	29	0,35
Pendiente	0,71	0,09	0,5	32	0,47
Bajo	0,26	0,07	0,5	145	0,33

Siendo: K_s = conductividad hidráulica del suelo saturado, θ_r = humedad correspondiente a saturación irreductible o humedad residual, θ_s = contenido de humedad para medio saturado, Ψ_c = potencial matricial crítico de succión del suelo, λ = parámetro adimensional conectividad de poros.

Las cotas de centros de celdas superficiales se extractaron de cartografías del IGM a escala 1:50000 previa digitalización y georeferenciación de las curvas de nivel. Para la estimación de la capacidad máxima de intercepción se consultó bibliografía específica (Chow, Mays y Maidment, 1994) y a personal del INTA Anguil, analizando el tipo de cultivo en cada caso. Los valores considerados promedian una capacidad máxima de intercepción del orden de 5 mm.

Los factores de cultivo para cada celda se estimaron en base a la clasificación de imágenes de satélite aplicando análisis multiestacional. Ello permitió conocer la clase de cultivo y porcentaje del mismo sobre el total, en cada celda. Las

fechas de siembra se consideraron para cada cultivo en forma diferenciada. La profundidad radicular del cultivo debió estimarse a los fines de determinar los nodos de la ZNS afectados por la evapotranspiración. A tal efecto se consideró una función del tiempo y del cultivo: para trigo y soja, se adoptó una profundidad de raíces media de 1,40 m, mientras que para el maíz y girasol se adoptó una profundidad de 1,90 m.

Calibración del modelo

Considerando a las lagunas Don Tomás y el Bajo Giuliani como sistemas hidrológicos cerrados, y a efectos de evaluar escurrimientos superficiales, se realizaron balances hidrológicos en las mismas. En virtud que, el resto de las componentes del balance fueron estimadas o medidas, durante los meses de octubre 2006 - abril 2007, se dedujeron los escurrimientos superficiales mensuales para cada laguna, que fueron utilizados para calibrar el modelo SHALL.

En este caso de aplicación se consideró como único parámetro de calibración, un coeficiente que multiplica las conductividades hidráulicas verticales de todas las celdas del modelo, dado que de los parámetros que regulan los procesos en la ZNS es el más relevante. El hecho de considerar solamente un parámetro sujeto a calibración, puede resultar en una simplificación importante, no obstante la ausencia de información freática durante el período considerado para la calibración no hizo posible el ajuste de los parámetros que regulan los procesos subterráneos de manera conjunta con los demás.

Se realizó un Balance Hidrológico mensual en las lagunas Don Tomás y del Bajo Giuliani, a partir de octubre de 2006. El Balance Hidrológico fue calculado mediante la siguiente expresión:

$$E_S = \frac{\Delta L - P - (Q_{PT} + Q_G + Q_B)D / A_L + E_V + Inf}{(A_C / A_L)}$$

Siendo E_S escurrimiento superficial (mm), ΔL variación mensual de nivel de pelo de agua en lagunas (mm), P precipitación mensual (mm), Q_{PT} caudal medio diario en planta de tratamiento de líquidos cloacales (m³/d), Q_G caudal medio diario subterráneo (m³/d), Q_B caudal de bombeo medio diario desde laguna Don Tomás (saliente en Don Tomás y entrante en Giuliani) (m³/d), D número de días del mes, E_V evaporación mensual (mm), Inf infiltración mensual (mm) de la laguna, A_C área de la cuenca de aporte, A_L área de la laguna. Los caudales Q_{PT} y Q_G no intervienen en el balance de la laguna Don Tomás.

La variación de niveles de las lagunas del Bajo Giuliani y Don Tomás fueron medidas

mensualmente. Las precipitaciones fueron registradas en tres pluviómetros; los cuales se ponderaron para cada cuenca mediante polígonos de Thiessen. Tanto los caudales de las Plantas de Tratamiento (Q_{PT}) de líquidos cloacales como los caudales bombeados desde laguna Don Tomás fueron suministrados mensualmente por la Sub-Dirección de Hidráulica Municipal. El caudal subterráneo para el bajo Giuliani se estimó aplicando la Ley de Darcy, una vez cuantificados los gradientes piezométricos (promediando sobre 19 pozos), transmisividades respectivas en pozos de bombeo y considerando como área de ingreso el perímetro de la laguna por la profundidad media. La evaporación fue estimada mediante la fórmula de Meyer. La infiltración en las lagunas fue estimada en los meses sin precipitación (por ende sin escurrimiento) despejándola de la ecuación de balance hidrológico y asumiendo valores constantes en el período de mediciones.

Estimados mediante balance hidrológico en los cuerpos de agua los escurrimientos mensuales, se procedió a calibrar el modelo SHALL para ambas cuencas de aporte. El período seleccionado para la calibración fue setiembre de 2006 - abril 2007 para el cual se contó con registros de niveles de las lagunas. No obstante la simulación se realizó desde enero del 2005 para que las condiciones iniciales propuestas al comienzo de la simulación afectaran mínimamente a los resultados.

Para realizar la simulación del período 2005-2007 hubo que procesar información de entrada del modelo. Se incorporaron series sintéticas de precipitaciones horarias para los tres pluviómetros, confeccionadas utilizando como base los registros horarios del pluviógrafo existente en la Facultad de Agronomía. También se requirió de datos diarios de evapotranspiración potencial que fueron estimados utilizando la fórmula de Penman con información meteorológica de la estación INTA Anguil.

En las Figs. 3 y 4 se comparan las series observadas y calculadas de escurrimiento superficial, luego de esta calibración previa, tanto para la laguna Don Tomás, como para la laguna del Bajo Giuliani. El coeficiente de determinación entre los valores observados y calculados de escurrimientos mensuales es $r^2 = 0,71$ y $r^2 = 0,78$, para Don Tomás y Bajo Giuliani, respectivamente, resultando en consecuencia una buena correlación en ambos casos.

Simulación del período 2007-2030

Una vez calibrado el modelo, se realizaron corridas de simulación en el período 2007-2030, para lo cual hubo que suponer un escenario futuro

respecto a las variables de entrada y de estado de los componentes considerados en el modelo. Para realizar la simulación se consideró un escenario futuro evaluando los caudales de aporte a la laguna Giuliani junto con el posible cambio en las variables climáticas.

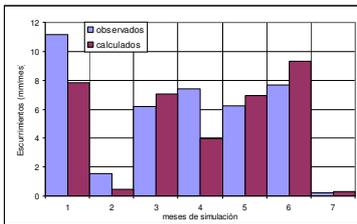


Fig. 3. Escurreimientos observados y medidos Laguna Don Tomás

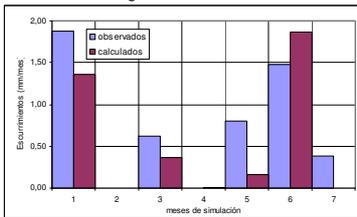


Fig. 4. Escurreimientos observados y medidos Laguna Bajo Giuliani

Se afectó el caudal de las plantas de tratamiento de líquidos cloacales por los índices de crecimiento demográfico esperados, de acuerdo al plan director urbano.

Además, se consideraron las precipitaciones correspondientes al promedio de los últimos veinte años de registros, distribuidas diariamente como el año 2005 e incrementadas anualmente un 0,5% anual, debido al efecto de calentamiento global.

Este escenario amerita estudios más profundos analizando la distribución de series de tormentas mediante modelos estocásticos o probabilísticos. Las series de lluvia propuestas aquí sólo se contemplaron para analizar la explotación del modelo ante un escenario futuro simplificado.

Para la evapotranspiración fue considerado simplificada el escenario actual, debido a que se presupone un período de aumento térmico en los años subsiguientes lo cual aumentaría la evapotranspiración pero compensado con una

merma de la misma por ser el período más húmedo.

Se estimaron los escurreimientos superficiales mensuales hasta el año 2030 con el modelo SHALL adoptando los parámetros de calibración, aplicando el mismo con las series de entrada definidas y partiendo de las condiciones alcanzadas en el año 2007.

El caudal de bombeo desde la Laguna Don Tomás, se estimó en función de los escurreimientos calculados por el modelo. A los efectos de simplificar los cálculos, se estimó que la totalidad de los escurreimientos superficiales que desembocan en la Laguna Don Tomás son bombeados hacia el Bajo Giuliani. Esto hace que la misma permanezca regulada en forma permanente y que no refleje crecimiento de niveles a lo largo del período analizado.

Se realizó el balance hidrológico de los cuerpos de agua efectuando simulaciones mensuales en el periodo 2007-2030 y se estimaron los niveles correspondientes a las Lagunas Don Tomás y del Bajo Giuliani.

En la laguna en el Bajo Giuliani se consideró un proceso de colmatación, por las características de los fluidos transportados desde las plantas de tratamiento, y un aumento de su espejo de agua, y consiguiente volumen de evaporación, debido al incremento sostenido de su nivel.

Los niveles resultantes del período de simulación, arrojan para el año 2030 un nivel de 167,05 m IGM para la Laguna Don Tomás y 146,3 m IGM para la Laguna del Bajo Giuliani, respectivamente (Fig. 5).

Conclusiones

La constitución del modelo SHALL puede considerarse satisfactoria, dado que se verificó la gran similitud de sus resultados con observaciones realizadas en la zona, teniendo en cuenta además, que permite simular la hidrología total del sistema.

Asimismo, puede garantizarse la aptitud del modelo para su aplicación en nuevos estudios, como también su interpolación a regiones similares a la analizada.

En virtud que el nivel de laguna Don Tomás depende de la estrategia de bombeo adoptada, puede presuponerse que las variaciones de su nivel serán siempre correctamente reguladas, permitiendo el normal funcionamiento de los desagües pluviales que desembocan en ella.

En función de los resultados obtenidos, la situación de la laguna Giuliani se tornaría crítica a partir del año 2009, cuando será alcanzada la cota mínima de calzada de la Ruta Provincial N° 14 = 129,80 m IGM, empeorando la situación a

partir del año 2012, en que se alcanzará la cota mínima de calzada de la Ruta Nacional Nº 35 = 131,80 m IGM.

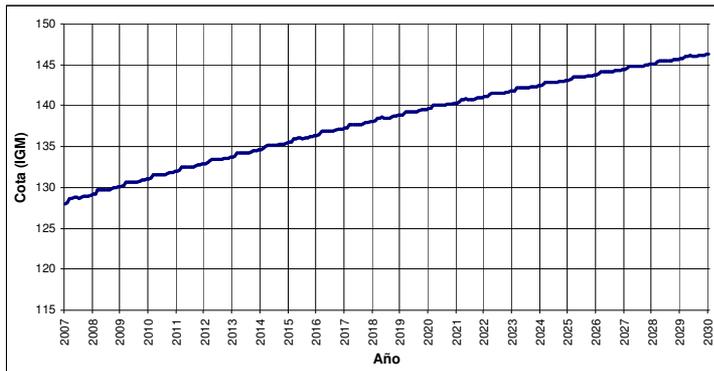


Fig. 5. Niveles futuros simulados Laguna Bajo Giuliani

En consecuencia, se recomienda intensificar estudios sobre escenarios futuros y relacionarlos con la búsqueda de fuentes alternativas de volcamiento.

Referencias

Chow VT, Maidment D, and Mays L .1994. *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill Interamericana SA; ISBN 0-07-010810-2; Colombia.

Consortio EIH .1986. Estudio para el saneamiento y control de niveles de la laguna Don Tomás y el desarrollo integral de su área de influencia. Consultora Grimaux y Asocs. S.A.T. Etapa 1-Volumen 1. Minist. de Obras Públicas y Servicios Públicos. La Pampa.

Cano, E. .1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de la Pampa. Clima, Geomorfología y Suelo. INTA, Gobierno de La Pampa y Universidad Nacional de La Pampa. Argentina.

Cunge J. 1975. Two dimensional modeling of flood plains. Mahmood K. and Yevjevich V. (eds). *Unsteady flow in open channels*. Water Resources Publications, Fort Collins.

Mecca JC. .2008. Análisis y modelación del comportamiento hidrológico de las lagunas Don Tomás y Bajo Giuliani (Santa Rosa, La Pampa). *Tesis de Maestría en Ciencias Hídricas*. Universidad Nacional de la Pampa.

Riccardi G. .1994. Un Modelo Matemático Hidrodinámico cuasi-bidimensional para escurrimiento cuasi-dinámicos. *XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR-LAD, Santiago. Chile.

Riccardi G, Zimmermann E, Maurig R .1995. Mathematical Modelling of Flood Propagation for the Delimitation of Rural, Semiurbanized and Urbanized Zones with Inundation Risk. *IAHS International*

Symposium on Runoff Computations for Water Projects, St. Petersburg - Federación Rusa.

Riccardi G. .1997a. The mathematical modelling of flood propagation for the delimitation of inundation risk zone. Rosberg D (ed). *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty* IAHS Publication Nro 240, ISSN 0144-7815., Wallingford. 355-364.

Riccardi G. 1997b. El Mapeo de Riesgo de Inundación por medio de la Modelación Matemática Hidrodinámica. *Revista Ingeniería del Agua*. Vol. 4 (3), ISSN 1134-2196, Univ. Politécnica de Valencia, 45-56.

Riccardi G, Zimmermann E. 1999. La Modelación Matemática Bidimensional de Escurrimiento Subterráneo mediante Esquemas de Celdas. Tineo A (ed). *Hidrología Subterránea*. ISSN 1514-4186, Instituto Sup. de Correl. Geol. CONICET, Tucumán, 79-88.

Zimmermann E., Riccardi G. .2010. Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanuras (SHALL). I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul. Bs.As. Enviado para su aceptación.