

Estimación de ET de un sistema de humedales construidos en regiones semiáridas, Valle de las Palmas, México

Michelle Hallack¹, Juan Payán², Eugenio Molina-Navarro³, Jorge Ramírez²

Centro de Ingeniería y Tecnología¹, Instituto de Ingeniería², Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente³
Universidad Autónoma de Baja California^{1,2} Universidad de Alcalá³

Tijuana, B. C.; Mexicali, B. C.; México

[mhallack, cpayan, jorger]@uabc.edu.mx, eugenio.molinanavarro@gmail.com

Abstract—The growing need for wastewater treatment has been forced to seek alternatives to what has been proposed using constructed wetlands. They are accepted by developing countries such as purifying systems simple technology and low cost. For this study we have constructed a wetland in a semi-arid region of northwest Mexico, in the town of Valle de Las Palmas, Tijuana, Mexico. The objective of this study is the behavior of constructed wetland in hydrological terms, a water balance system in order to determine whether there affectations regarding precipitation and evapotranspiration are performed. The hydrologic modeling was performed with the program and HIDROBAS Potential Evapotranspiration, Real and Balance was determined.

Keywords— *Estimation. Evapotranspiration. Constructed Wetlands, Semiarid regions, Water Balance, Hidrobas.*

Resumen— La creciente necesidad en tratamiento de aguas residuales ha obligado a buscar alternativas, para lo que se ha planteado utilizar humedales construidos. Son aceptados por países en desarrollo en la depuración como sistemas de tecnología simple y bajo costo. Para este estudio se ha construido un humedal en una región semiárida al noroeste de México, en la localidad de Valle de las Palmas, Tijuana, México. El objetivo de este estudio es el comportamiento del humedal construido en términos hidrológicos, se realiza un balance hídrico al sistema con la finalidad de determinar si existen afectaciones en cuanto a precipitación y evapotranspiración. El modelaje hidrológico se ha realizado con el programa HIDROBAS y se determinó la Evapotranspiración Potencial, Real y el Balance.

Palabras claves— *Estimación, Evapotranspiración, Humedales construidos, Regiones semiáridas, Balance Hídrico, Hidrobas.*

I. INTRODUCCIÓN

Los humedales construidos son sistemas que se utilizan en el tratamiento de las aguas residuales mediante procesos naturales [1] provenientes de diferentes actividades realizadas por el ser humano, son considerados mecanismos de ingeniería con tecnología simple de bajo costo en operación y mantenimiento [1,2]. Las Investigaciones de los últimos años [3,4] han mostrado una considerable evolución en esta tecnología con resultados favorables en la remoción de contaminantes y en donde las condiciones climáticas del sitio pueden interferir en el rendimiento [3] y la eficiencia de estos sistemas. Al igual que en los estudios donde se requiera conocer condiciones y aspectos hidrológicos del sitio, se deben considerar al momento del diseño de los humedales construidos, principalmente en las regiones áridas y semiáridas ya que éstas presentan una sensibilidad a las variaciones en el clima donde específicamente el análisis de la Evapotranspiración (ET) es un factor importante de cambios ambientales locales presentes en las regiones semiáridas [5] en la elaboración de estudios hidrológicos de la zona [6]. La evapotranspiración puede definirse como el transporte del agua entre la superficie y la atmósfera, representa el flujo compuesto de agua interceptada, superficial y poco profunda contenida en el suelo evaporada por la energía solar [7] como también el agua que transpiran las plantas. Para determinar este parámetro existen diversas maneras, mediante el uso de métodos estadísticos [8], sensores remotos con apoyo satelital [9] así como modelación [10]. Para este trabajo utilizaremos en la

estimación del parámetro de ET potencial y real, el paquete de programas para la evaluación de aportaciones hídricas-HIDROBAS desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España y el Ministerio de Ciencia y Tecnología [11] en España, el cual utiliza datos de precipitación y temperatura del lugar. El objetivo de este estudio es a partir de un Balance Hídrico del suelo en una zona con clima semidesértico mediterráneo diseñar un humedal artificial que no únicamente sea construido para depurar aguas residuales sino que además, pueda ser considerado tanto; como parte del ecosistema natural y de los cuerpos de agua de la cuenca hidrológica. De esta forma, se analiza a manera de caso de estudio el humedal construido en el Centro de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California en su unidad Valle de las Palmas, México.

II. MATERIALES Y METODOS

A. Área de estudio

La zona en estudio consiste en una microcuenca con una superficie de 15.77 Km² que forma parte de la cuenca binacional Río Tijuana ubicada al noroeste de México y que comprende una porción del estado de California, E.U.A. y otra en el estado de Baja California, México. La microcuenca donde el humedal se ha construido está situada al sureste de la ciudad de Tijuana, México, en la comunidad de Valle de las Palmas (Figura 1) con las coordenadas 32° 26' 4.88" de Latitud Norte y, 116° 40' 30.6" de longitud Oeste y elevación promedio de 300 metros sobre el nivel del mar. Las características ambientales están definidas por un clima templado y seco con lluvias mayormente en los meses de invierno. La región es semiárida con muy escasas lluvias en promedio de 280 mm [12] de precipitación media anual.

B. Descripción general del sistema

El sistema de humedal en estudio está compuesto por dos filtros con una superficie total de 35 m², tiene un régimen de flujo de tipo subsuperficial donde el agua residual fluye ligeramente por debajo de la superficie del medio filtrante [4]. El sistema es llamado combinado o híbrido por tener direcciones de flujo diferentes a través del estrato, el de flujo vertical se abastece el líquido en la superficie y se mueve hacia fondo y el de flujo horizontal se abastece desde un costado y recorre hasta el contrario; ambos filtros fluyen por los efectos de la gravedad y están conectados en serie. En la Tabla I se presenta las características del detalle constructivo.

Tabla I. Características constructivas del sistema de Humedales

CARACTERÍSTICAS	FILTRO VERTICAL	FILTRO HORIZONTAL
Largo (m)	5.80	6.00
Ancho (m)	2.70	3.20
Profundidad (m)	0.70	0.60
Medio filtrante	Arena gruesa (0.50 m) Grava ¾"- 1½" (0.20 m)	Grava ¾"- 1½"
Red de tuberías:	Diámetros:	Diámetros:
Suministro	2"	4"
Recolección	4"	4"
Plantas macrófitas	Tule (<i>Schoenoplectus acutus</i>)	Carrizo (<i>Phragmites Australis</i>)

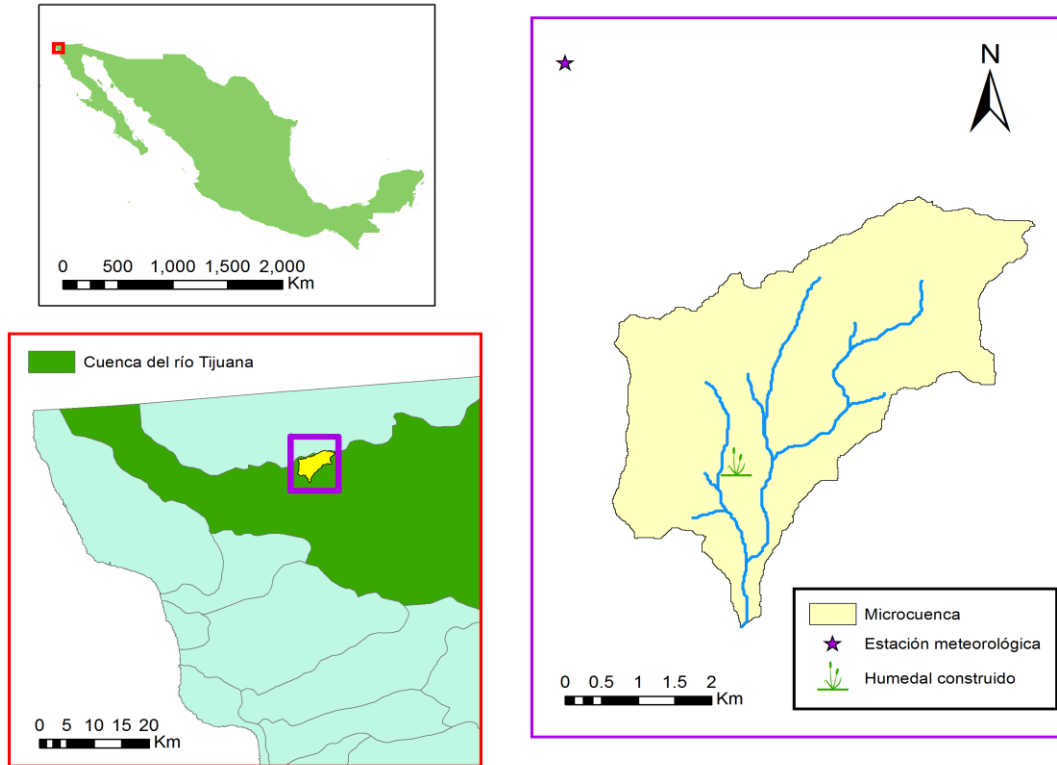


Fig. 1. Localización de la microcuenca en el contexto de la cuenca Rio Tijuana (verde oscuro).

C. *Obtención de los datos meteorológicos*

La información climatológica utilizada para los cálculos de los parámetros hidrológicos se obtuvo de la base de datos del Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC III, proporcionada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) [13] y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Organismo Regional [14]. Los datos utilizados en este estudio, son las series diarias de precipitación y temperatura durante el periodo de 1991 a 2008. La estación meteorológica considerada es denominada el Carrizo-Tecate, se localiza aproximadamente a 6.5 km al Norte de la microcuenca (Longitud 116° 42.0', Latitud 32° 29.0' y una Altitud de 495.0 m.s.n.m.), fue seleccionada por ser la estación más próxima a la zona en estudio y ubicarse en un área con características topográficas y morfológicas de la cuenca muy similares.

D. *Evapotranspiración*

Los parámetros hidrológicos de Evapotranspiración Potencial (ETP) y Real (ETR) requeridos para calcular el Balance Hídrico (BH) se obtuvieron utilizando el programa HIDROBAS [11]. Se ha calculado la ETP y la ETR por los métodos de Thornthwaite y Turc, respectivamente.

De acuerdo a Francisco Aparicio [15], el método de Thornthwaite utiliza datos de temperaturas medias mensuales y obtiene la ETP a partir de la siguiente expresión:

$$ETP = 1.6 ka \left(\frac{10T}{I} \right)^a \tag{1}$$

Dónde:

ETP = Evaporación potencial no ajustada para meses de 30 días de 12 horas luz (mm)

T = Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

ka = constante que depende de la latitud y el mes del año

I = suma de (i) para todos los meses del año o semana anual de calor

a = constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura, cuyo valor es:

$$a = 0.000000675 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.017925 I + 0.49239 \quad (2)$$

i = eficiencia de la temperatura

I = índice anual de calor (o temperatura). Es la suma de las eficiencias mensuales de Temperatura.

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad (3)$$

La evapotranspiración potencial no ajustada se corrige por la duración real del día en horas y los días del mes y se obtiene la evapotranspiración potencial ajustada.

El método de Turc, según Custodio [16] determina la ETR a partir de los datos de precipitación anual y de temperatura media anual mediante la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (4)$$

Dónde:

ETR = Evapotranspiración anual (mm)

P = precipitación anual (mm)

L = coeficiente que depende de la temperatura media anual, y se obtiene:

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

T = temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$)

Con la intención de estimar la capacidad de campo se han evaluado las características de los suelos de la zona según lo descrito en el Mapa de Suelos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [17] correspondiente al ejido Valle de las Palmas, así como análisis del suelo y observaciones de campo, aplicando posteriormente el método descrito por Fuentes y García [18] que establece que la capacidad de campo se puede obtener a partir de conocer la composición de la textura del suelo y la profundidad del mismo. El cálculo del BH se obtuvo a partir de los datos de Evapotranspiración potencial mensual y la Pluviometría particularmente de los años tipo: secos, medios y húmedos para dos valores en hipótesis de reserva de agua en el suelo. Con el fin de evaluar la disponibilidad de agua contenida en el suelo se caracterizaron los años hidrológicos medios, secos (años con precipitación inferior a la media en un 15%) y húmedos (años con precipitación superior a la media en un 15%), bajo las diferentes circunstancias meteorológicas en específico las más desfavorables. Con el HIDROBAS se determina un año "tipo" para cada una de las categorías antes mencionadas partiendo de los datos de precipitación.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

El registro de los datos de precipitación media anual obtenida de la estación El Carrizo-Tecate para el periodo de 1991 a 2008 se muestran en la Figura 2, Se observa valores de precipitación anuales bajos casi en la mitad del periodo y muy variantes, de esto se puede entender el reflejo en los valores bajos de los años húmedos y secos (15% por arriba y debajo de la media). A partir de esta variación se puede justificar la necesidad de caracterizar los años “tipo” secos, medios y húmedos y la importancia de determinar estos límites con el modelo.

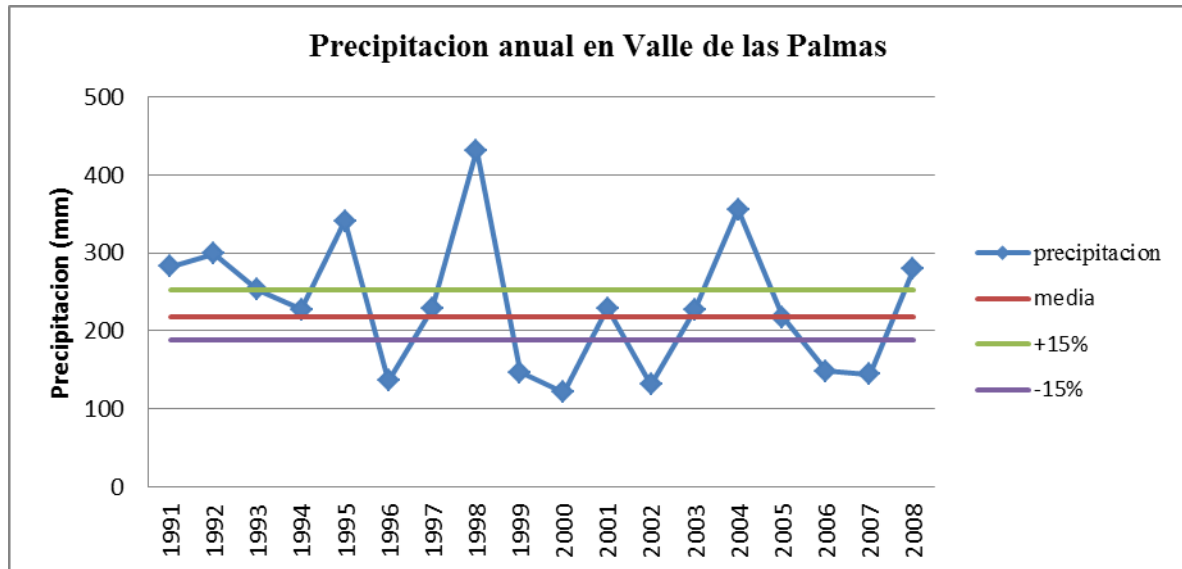


Fig. 2. Precipitación anual en la estación el Carrizo-Tecate

El rango del valor de reserva de agua en el suelo obtenido esta entre 40 y 60 mm, determinados a partir del método descrito por Fuentes y García [18]. Para aplicar esta metodología fue necesario obtener las características de composición de la textura y la profundidad del suelo como algunas observaciones realizadas en campo. Para la estimación de la reserva de agua se consideraron los siguientes valores promedio: espesor medio del suelo de 60 cm, capacidad de campo de 18.6%, punto de marchitamiento de 8% y densidad del suelo de 1.30 gr/cm³. Con los valores promedio se calcularon los parámetros hidrológicos mensuales de la microcuenca (Tabla II) para los diferentes años “tipo”, que forman parte de este estudio.

Los resultados de BH para la microcuenca se muestran en la Tabla II, puede observarse que estos resultados son para el valor de 40 mm en hipótesis de reserva únicamente, ya que los valores entre las dos hipótesis fueron similares. Los años secos presentaron valores iguales en el balance para las dos hipótesis en el periodo anual analizado; con esto se determina que no hay volumen disponible.

Algo similar sucede para los años medio, aunque es visible que en los meses de mayor precipitación llega a presentarse ligeramente un excedente de agua, para el valor de la hipótesis de reserva analizada, ya que la capacidad del suelo para contener agua es menor y permitirá escurrimientos, sin embargo no existe consideración de volumen disponible ya que los resultados muestran diferencia mínima de 0.36% mensual entre el volumen de precipitación y el volumen de ETR, además la ETR es máxima porque toma los valores de ETP para los meses de excedencia y para los meses de déficit la ETP presenta volúmenes altos.

Para los años húmedos, los excedentes se presentan de manera similar para el periodo en los meses de excedencia que para los años secos y medios, aunque como se puede observar los valores anuales de

precipitación y ETR aumentaron en un 20 % respecto a los medios, presentando una diferencia de 2.08% mensual. Sin embargo, considerando los resultados mostrados en la tabla II y los análisis presentados para los años medios, donde la ETR es máxima al momento que toma los valores de ETP durante los meses de excedencia y para los meses de déficit la ETP presenta volúmenes altos, se descarta la posibilidad de que exista volumen de agua disponible como aportación al humedal, es decir, los valores de Precipitación que comprenden el periodo utilizado en este trabajo, muestran una igualdad en la mayoría de los meses con respecto a los valores de ETR pero muy por debajo que los valores de ETP, con esto se determina que, toda el agua que entra a la microcuenca se pierde por el proceso hidrológico de evapotranspiración.

Tabla II. Balance mensual para los años “TIPO” (en mm)

	Hipótesis de reserva= 40												
Año seco	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
Precipitación	4.65	13.60	17.22	19.65	30.03	24.83	17.65	2.45	1.47	0.22	0.20	6.03	138.00
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	4.65	13.60	17.22	19.65	30.03	24.83	17.65	2.45	1.47	0.22	0.20	6.03	138.00
Reserva	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. ó Def.	-61.65	-35.40	-10.18	-10.95	-3.77	-10.07	-35.95	-63.75	-70.13	-90.98	-105.10	-70.97	
Año medio													
Precipitación	11.99	16.04	31.37	44.74	59.56	41.48	16.98	3.75	1.16	1.74	1.13	3.38	233.31
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	11.99	16.04	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	7.13	1.16	1.74	1.13	3.38	222.87
Reserva	0.00	0.00	3.97	18.11	40.00	40.00	3.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. ó Def.	-54.31	-32.96	0.00	0.00	3.86	6.58	0.00	-59.07	-70.44	-89.46	-104.17	-73.62	
Año húmedo													
Precipitación	25.00	19.84	44.07	63.13	76.79	63.47	14.27	5.87	1.21	3.80	2.46	0.46	320.37
ETP	66.30	49.00	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	66.20	71.60	91.20	105.30	77.00	706.90
ETR	25.00	19.84	27.40	30.60	33.80	34.90	53.60	6.54	1.21	3.80	2.46	0.46	239.61
Reserva	0.00	0.00	16.67	40.00	40.00	40.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exc. ó Def.	-41.30	-29.16	0.00	9.20	42.99	28.57	0.00	-59.66	-70.39	-87.40	-102.84	-76.54	

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que para el diseño e implementación de humedales construidos en regiones semiáridas similares a la de este estudio quedan definidos únicamente por la aportación de las aguas residuales que se suministre al sistema para su depuración. Se debe asegurar que durante su vida útil estén abastecidos del agua residual, sobre todo en los meses de mayor déficit, a fin de mantener el hábitat que en él se genera y que forme parte del ecosistema natural.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la 16va. Convocatoria Interna de Proyectos de Investigación de la UABC y, por CONACYT, a través del apoyo otorgado al segundo autor. Los autores agradecen al Centro de Ingeniería y Tecnología y al Instituto de Ingeniería de la UABC por su valioso apoyo durante la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Vymazal, "Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment," *Ecological engineering*, vol. 25, no. 5, pp. 478-490, 2005.
- [2] J. Rodriguez y Duran de Bazua, "Remocion de Nitrogeno en un sistema de Tratamiento de Aguas Residuales usando humedales artificiales de flujo vertical escala de banco," *Tecnol. Ciencia y Ed. (IMIQ)*, vol. 21, no. 1, pp. 25-33, 2006.
- [3] R., Kadlec, S., Wallace, *Treatment Wetlands*, second ed., Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA ISBN 978-1-56670-526-4, 2009.
- [4] J. Vymazal, "the use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater," *Ecological engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 1-17, 2008.
- [5] C. Yunhao, L. Xiaobing, L. Jing, S. Peijun and D. Wen, "Estimation of daily evapotranspiration using a two-layer remote sensing model," *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1755-1762, 2005.
- [6] S. Ambast, A. Keshari and A. Gosain, "Estimating Regional Evapotranspiration using Remote Sensing: Application to Sone Low Level Canal System, India," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 134, no. 1, 2008.
- [7] W. Barclay, S. Huddleston, C. Boudreau and A. O'Reilly, "Sensitivity of wetland saturated hydraulic heads and water budgets to evapotranspiration wetlands," *The Society of Wetlands Scientist*, Vols. 28., no. 4, pp. 1040-1047, 2008.
- [8] M. Lakatos, A. Czudar and L. Szlavik, "Forecast of changes concerning the Water Budget in a Wetland of Danube Floodplain," *Journal of Environmental Science and Engineering*, vol. 5, pp. 523-532, 2011.
- [9] E. Glenna, L. Mexicano, J. Garcia-Hernandez, P. Naglerc, M. Gomez, D. Tanga, M. Lomeli, J. Ramirez, F. Zamora, "Evapotranspiration and water balance of an anthropogenic coastal desert wetland: Responses to fire, inflows and salinities," *Ecological Engineering*, vol. Article in Press, 2013.
- [10] E. Eiji, D. Wilberg, P. Pellikka, "Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenia," *Applied Geography*, vol. 31, pp. 251-258, 2011.
- [11] Hidrobas v 3.0 win, J. Alonso, J. Arjona, A. Ballester, F. Elorza, M. Gomez, R. Hernandez, M. Hervas, A. Iglesias, T. Iglesias, J. Lopez, J.A. Lopez, A. de Mera, J. Ortiz, "Hidrobas v 3.0 win," Instituto Geologico y Minero de Espana y Universidad Politecnica de Madrid, 2000.
- [12] M. Hallack-Alegria, J. Ramirez-Hernandez and D. W. Watkins, Jr., "ENSO-conditioned rainfall drought frequency analysis in northwest Baja California, Mexico," *Royal Meteorological Society, International Journal of Climatology*, 2011.
- [13] Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA). Organismo publico Descentralizado coordinado por la SEMARNAT, 2013. <http://www.imta.gob.mx/productos/software/>.
- [14] Comision Nacional del Agua (CONAGUA)-Gerencia Organismo de Cuenca Peninsula de Baja California, 2013. <http://www.conagua.gob.mx/>.
- [15] F. Aparicio, *Fundamentos de Hidrologia de Superficie*, Mexico, Limusa, 1992. ISBN 968-18-3014-8.
- [16] E. Custodio y M. LLamas, *Hidrologia Subterranea*, 2 tomos, Barcelona, Omega, 1983.

ISBN 9788428202817.

- [17] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mapas Digitales de México, 2014. <http://gaia.inegi.org.mx/>
- [18] J. Fuentes y G. García, Técnicas de Riego-Sistemas de Riego en la Agricultura, México y España: Mundi-Prensa México, S.A de C.V., 1999. ISBN 968-7462-17-5.