



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CD. JUAREZ

Instituto de Arquitectura Diseño y Arte

Análisis y aplicación de un modelo empírico-conceptual  
para la identificación de zonas potenciales de recarga  
hídrica: Cuenca de Laguna Bustillos, Chihuahua.

Proyecto de titulación que presenta:

Luis Raúl Rodríguez Marín.

Leoncio Elmer Ornelas Olivas.

Como requisito parcial para obtener el grado de

Licenciado en Geoinformática

Cd. Cuauhtémoc, Chih.

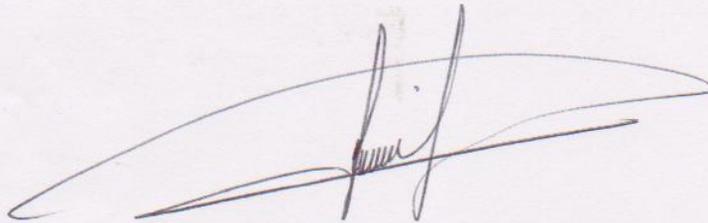
Mayo 2013

Este proyecto de titulación fue aceptado por el comité revisor designado por la academia del programa de Geoinformática en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciado en Geoinformática



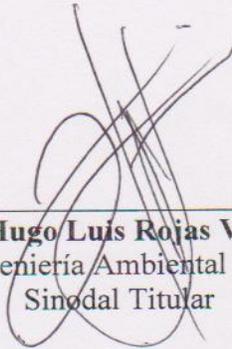
---

**Dr. Luis Carlos Bravo Peña**  
Dr. en Ciencias Opción en Desarrollo Regional  
Director de Proyecto



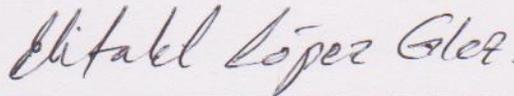
---

**Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo**  
Dr. en Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente  
Sinodal Titular



---

**MIAE. Hugo Luis Rojas Villalobos**  
MIAE. en Ingeniería Ambiental y Ecosistemas  
Sinodal Titular



---

**Dr. Elifalet López González**  
Dr. en Matemáticas  
Sinodal Suplente

Mayo de 2013

## **DEDICATORIA**

A dios padre, por habernos dado fuerzas y haber ayudado a culminar con nuestros estudios.

A nuestros padres, que por su apoyo incondicional, ejemplo de lucha y esfuerzo hemos podido llegar a la terminación de nuestros estudios, porque sin su apoyo jamás avíanos podido lograr terminar nuestra carrera.

A nuestros hermanos y primos para que este logro sea un ejemplo de inspiración y superación para ellos.

A nuestro asesor, Dr. Luis Carlos Bravo Peña, que nos brindó su apoyo y esfuerzo para poder realizar este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, por habernos abierto las puertas a ingresar en esta Licenciatura, así como también habernos permitido realizar nuestros estudios en la carrera de Lic. Geoinformática.

A nuestros profesores, por habernos regalado y transmitido sus conocimientos, sabiduría y habernos tenido paciencia.

A todos nuestros amigos, colegas y en especial a la generación 2009-2013 por su amistad, compañerismo y lecciones aprendidas.

## AGRADECIMIENTOS

Durante todo este tiempo de lucha, momentos de éxito y angustia para poder cumplir con nuestros objetivos y poder alcanzar uno de nuestras metas que es culminar nuestro proyecto de titulación, es por ello que debemos agradecer a quienes en todo momento nos llenaron de su apoyo y sobre todo por su amistad:

A Dios por habernos guiado y acompañado a lo largo de nuestro proyecto de titulación, por brindarnos una vida llena de experiencias y aprendizajes pero sobre todo felicidad.

A nuestro asesor y consejero, Dr. Luis Carlos Bravo Peña, por sus consejos, orientación y ayuda que nos brindó para la realización de nuestro proyecto de titulación, por su apoyo y amistad que nos permitió aprender de sus conocimientos.

A nuestros profesores que nos han acompañado durante todo este tiempo, brindándonos una orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos, además de todos sus sabios consejos durante nuestras carreras, afianzando así nuestra formación como estudiantes universitarios.

A nuestros sinodales Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo, Mtro. Hugo Luis Rojas Villalobos y Dr. Elifalet López González.

A nuestros compañeros de licenciatura, por los momentos y aprendizajes compartidos, que sin su apoyo y compañía este tiempo no hubiera sido el mismo.

A la Universidad autónoma de ciudad Juárez por habernos dado la oportunidad y por las lecciones que aprendimos en ella, asimismo, por habernos dado su voto de confianza y por todo el apoyo otorgado a nuestras personas.

De antemano muchas gracias.

## **Análisis y aplicación de un modelo empírico-conceptual para la identificación de zonas potenciales para recarga hídrica: cuenca de Laguna de Bustillos, Chihuahua.**

### **Resumen**

A partir de la década de los setenta ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobre-explotados en México. Esta situación hace necesario impulsar acciones de recarga de los mantos freáticos, sustentadas en la identificación científica de las áreas con mayor potencialidad para la infiltración de las aguas superficiales. En este trabajo se identifican modelos de selección de áreas potenciales para recarga de acuíferos susceptibles de utilizarse en el área de captación de la cuenca Laguna de Bustillos, y se evalúan en función de sus requerimientos de información y los datos disponibles para la zona. Se analizaron cuatro modelos empleados en otras latitudes del mundo, y se seleccionó un modelo que

pondera datos cartográficos del medio físico existentes para la zona (pendiente, tipo y usos de suelo, cobertura vegetal y tipo de roca). Este modelo se probó con los datos locales, encontrándose que el 96.44% del área total de captación del acuífero tiene posibilidades moderadas y altas de recarga, mientras que sólo el 3.56% del área tiene bajas posibilidades. El modelo seleccionado puede emplearse en otras regiones de Chihuahua con igual disponibilidad de datos, pero se identifican las necesidades de información cartográfica que deben resolverse para fortalecer los resultados.

Palabras claves: Acuíferos, Recarga, Modelos, Cartografía.

## **Analysis and application of a empirical-conceptual model for identification of water recharge potential zones in Cuenca Laguna de Bustillos, Chihuahua.**

### **Abstract**

From the seventies decade of the past century, the number of over-exploited aquifers in Mexico has increased substantially. This situation makes necessary to promote actions for

groundwater recharge that must be based in the scientific identification of the better areas for infiltrating of surface waters. In this work are identified models for selecting recharge areas in the catchment surface of

Cuauhtémoc aquifer's, and they were evaluated in according of their information requirements and the available local data. Were analyzed four models used in other parts of the world, and selected one that weights the cartographic data available for the zone (slope, soil type and use, vegetation cover and rock type). The selected model was tested with local data. It was found that the 96.44% of the aquifer's catchment area

has moderate or high possibilities for recharge, while the 3.56% of remaining surface has a low recharge possibility. The selected model can be used in others regions of Chihuahua with the same data availability, but it is identified the necessities of cartographic information that must be solved to strengthen the results.

Key Words: Aquifer, Recharge, Models, Cartography.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad la República Mexicana muestra un deterioro acelerado de los recursos naturales, (Torres, 2000). Presenta un marcado incremento poblacional (INEGI, 2005), además de un desarrollo acelerado de distintas actividades productivas. Estos fenómenos generan una presión muy importante sobre las reservas de agua del país. Como consecuencia de esto, se observa una sobreexplotación importante sobre este recurso (Torres, 2000). El empleo del agua subterránea se ha llevado a cabo sin tomar en cuenta un manejo eficiente y sustentable, a tal grado, que los volúmenes de demanda son mayores a los suministrados (Cotler, 2004).

El uso inapropiado de los distintos recursos naturales, trae consigo problemas como es la escasez de agua en varias regiones del país (Martínez, 2009). Esta problemática ha causado fuertes conflictos en diferentes regiones y comunidades del país (Barkin, 2004). El agua es el recurso natural del que dependen la vida humana, la seguridad alimentaria y la salud de los ecosistemas (García, 1998).

Los impactos ambientales de la sobreexplotación del acuífero se han observado en numerosos lugares en todo el mundo (Llamas, 1992). La escasez del agua ha orillado a la extracción desordenada del agua subterránea, hasta el grado de convertirse ya en una amenaza para el

desarrollo de las regiones que dependen del agua del subsuelo para realizar las diversas actividades económicas, y para abastecerse de agua potable (Martínez, 2009).

La inadecuada planeación de este recurso y la utilización inadecuada e irracional, ha traído como consecuencia una sobreexplotación de acuíferos. A partir de la década de los setenta, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobre-explotados (CONAGUA, 2011). En el año 1975 eran 32 acuíferos, 80 en 1985, y 100 acuíferos sobre explotados al 31 de diciembre del 2009 (CONAGUA, 2011).

Debido al grave problema que se tiene de sobreexplotación de acuíferos se hace necesario impulsar acciones de recarga de los mismos, que contribuyan a reducir esta problemática (SMA, 2007). En este sentido, diferentes organizaciones nacionales y locales tienen en cuenta que un aumento de la recarga de acuíferos representa una oportunidad para incrementar la garantía y la calidad de las fuentes de agua en poblaciones con carencia de este recurso (Castillo, 2008). Se cuentan con diferentes acciones para apoyar la recarga de un acuífero, estas prácticas se han utilizado por siglos en distintas regiones del país y del mundo además de ser aplicadas en regiones

áridas y semiáridas (Molina, 2000). Los procedimientos que se utilizan y se ponen en práctica son condicionados por distintos factores físicos, económicos y sociales (Molina, 2000).

Entre las acciones más efectivas, destacan los estudios para identificar áreas de recarga. Estos pueden realizarse mediante el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) ya que se han utilizado en forma sistemática desde hace por lo menos 20 años (CONAGUA, 2011). Unos de los principales resultados de los SIG son los mapas, ya que son de gran utilidad para las zonas críticas de recarga de los acuíferos (Morgan, 2005).

Los estudios de los acuíferos pueden apoyar para obtener un proyecto de la recarga exitoso. Para esto es necesario que se cuente con una buena planeación además de que estén bien diseñados, operados y sean parte de distintas estrategias para los recursos hídricos (Garduño, 2003). Alrededor del mundo se cuenta con distintos modelos sobre la identificación de zonas de recargas potenciales (Vásquez, 2008), para identificar estas zonas de recarga se han tomado en cuenta distintas variables relacionadas con la pendiente, usos de suelo, vegetación entre muchas otras (INAB, 2003). Uno de los principales problemas en

buena medida, es que no se sabe dónde se ubican las principales áreas de recarga y por otra, a que los actores locales u organismos responsables del manejo de las cuencas no disponen de metodologías prácticas necesarias (Vásquez, 2008).

### **1.1. Justificación.**

A medida que la problemática de los acuíferos se agrava, se hace necesario identificar adecuadamente las zonas de recarga hídrica (Aguirre, 2003). Esto con la finalidad de proponer la implementación de técnicas y prácticas necesarias o aptas, que ayuden a la conservación, recuperación, protección ambiental y de la biodiversidad, que se encuentra en estas áreas, para poder tener un buen aprovechamiento y utilización de lo que es este recurso hídrico (Polioptró F, et al, 2010). El mal aprovechamiento, la utilización y gran deterioro de las zonas de recarga hídrica se agravan por carecer de información básica, como la ubicación espacial de las áreas de recarga, lo que lleva a su desprotección (Parra y Ortiz -- INIFAP, 2004). Es importante mencionar que si se contara con la ubicación y la información apropiada sobre estas áreas de recarga, se podrán orientar hacia los usuarios de estos lugares para tener un buen manejo de estas áreas (Matus, 2007).

De no llevarse a cabo una implementación de alguna estrategia para poder frenar el mal uso del recurso se puede ocasionar el desabasto de este, así como su agotamiento (CONAGUA, 2002).

El manejo y gestión de las zonas de recarga hídrica es uno de los desafíos importantes después de identificar y evaluar, ya que los servicios que brinda están fuera del sitio (Castillo, 2008).

La literatura menciona técnicas, estrategias y modelos para el manejo de las zonas de recarga hídrica (Izaguirre J., 2007), pero no todos los modelos para identificación de áreas potenciales de recarga hídrica son aplicables en el territorio de México, pues se carece de la información básica que estos utilizaban. Por este motivo, es conveniente verificar distintos modelos o también realizar un modelo propio para una región en particular.

### **1.2. Hipótesis.**

La identificación y análisis de los modelos actuales de recarga de acuíferos existentes en la bibliografía permitirá: a) definir el modelo más apropiado para las condiciones de la cuenca Laguna de Bustillos, b) identificar las necesidades más

apremiantes de generación de información cartográfica para la aplicación de los modelos apropiados en esta zona de estudio.

### 1.3. Objetivos.

General:

Identificar y analizar los modelos de selección de áreas de recarga de acuíferos susceptibles de ser evaluados localmente en el área de captación de la cuenca Laguna de Bustillos:

- i) identificar los modelos actuales para definir áreas de recarga de acuíferos;
- ii) establecer sus requerimientos de información cartográfica, y cotejarlos con la información cartográfica;
- iii) identificar el modelo cuyos requerimientos de información sean más compatibles con la información disponible para esta zona; y,
- iv) probar el modelo seleccionado, identificando áreas potenciales de recarga en la Cuenca Laguna Bustillos.

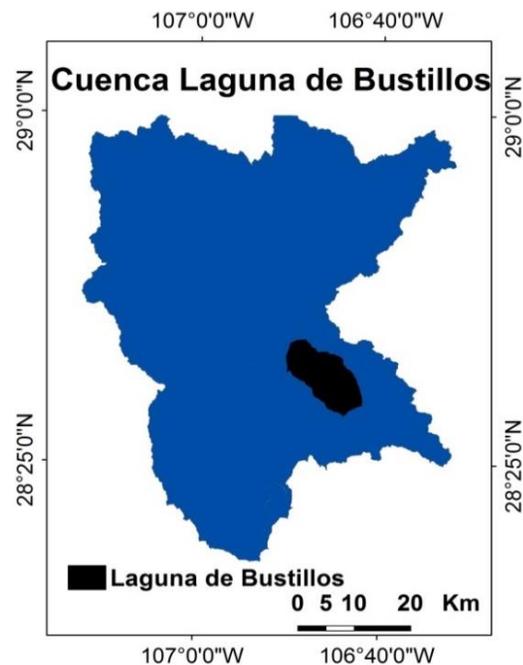
## 2. METODOLOGÍA.

### 2.1- Área en estudio.

El área de estudio se localiza en la cuenca hidrológica Laguna de Bustillos (Figura 1) la cual se encuentra a 100 kilómetros aproximadamente, de la capital del estado de Chihuahua. La cuenca tiene una altitud

mínima de 2,060 metros sobre el nivel del mar en las partes más bajas, aunque las montañas del parteaguas alcanzan hasta 2800 msnm. Colinda con los municipios; al sur con Cusihiuriachi, al este con Riva Palacio, al norte con Namiquipa y Gran Morelos y al oeste con Bachíniva y Guerrero (CNA, 2002).

Figura 1. Cuenca Laguna de Bustillos.



La recarga natural del acuífero proviene de la precipitación pluvial que se realiza sobre toda el área de estudio, la cual se infiltra y alimenta por flujo subterráneo horizontal al acuífero, y la inducida fundamentalmente por retornos del riego. En condiciones naturales, la descarga debió de

efectuarse a través de la Laguna Bustillos, por evapotranspiración y por una salida al sur. En la actualidad se realiza de manera artificial por bombeo de pozos, norias y evaporación de la lámina de agua de la laguna Bustillos (CNA, 2002).

## **2.2- Procedimientos.**

Los procedimientos para identificar el modelo más apropiado a la zona, y explorar sus posibilidades de aplicación local se dividieron en cuatro etapas:

1) Identificación de los modelos actuales para definir áreas de recarga en cuencas.

Esta etapa implicó una revisión bibliográfica exhaustiva. Se realizó principalmente la investigación de modelos de recarga en cuencas, que han sido aplicados en distintas partes del mundo, especialmente en zonas semiáridas, ya que se pretende identificar modelos que se aplicaron en zonas similares al área en estudio. Se tuvo en cuenta aspectos similares naturales como el clima y relieve, además de distintos aspectos antrópicos como son las actividades agrícolas y la urbanización que existe en la región.

2) Establecimiento de los requerimientos de información del modelo identificado en la fase 1, y cotejo con la información local. En

esta etapa se realizó un análisis de cada uno de los modelos encontrados, esto con el objetivo de determinar y desglosar cada uno de los requerimientos de información con el que estas cuentan, ya sea climas, relieves, y topografía, edafología, tipos y usos de suelo, etc. Una vez realizado este análisis y bien identificada la información requerida para cada modelo, se cotejó con la información que se tiene para el área de estudio de este trabajo, verificando que los requerimientos de información de los modelos aplicados en otros lugares, estén disponibles para esta zona, o sea viable su generación en poco tiempo.

3) Identificación del modelo cuyos requerimientos de información sean más compatibles con la información disponible para esta zona.

Esta etapa consistió en la selección del modelo más apropiado cuyos requerimientos de información, sean más compatibles con la información que se cuenta a nivel local.

4) Prueba del modelo seleccionado en la fase 3, e identificación de áreas potenciales de recarga en la Cuenca Laguna Bustillos.

El siguiente paso fue probar de forma teórica el modelo que se seleccionó, realizando un ejercicio de prospección en

diferentes sitios de nuestra zona de estudio, obteniendo como resultado distintas zonas potenciales de recarga hídrica.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

a) Revisión de modelos y cotejo con la información local.

Ante distintos escenarios se tiene la necesidad de contar con métodos accesibles en el sentido económico, prácticos y que además sean de interés para los actores locales, organizaciones o bien las instituciones encargadas en el manejo del recurso del agua, se busca que este modelo permita identificar las zonas que cuenten con una alta posibilidad de recarga hídrica para así lograr organizar, proteger y manejar de una forma adecuada y responsable estas zonas de recarga hídrica que favorecen a las actividades principales del área de estudio, además de garantizar la calidad y cantidad de agua para esta zona (Silva, 2007). A nivel científico se encuentran distintos modelos para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, pero dichos modelos no son viables, en cuanto a lo económico para las instituciones o tomadores de decisiones responsables del manejo del agua (Silva, 2007).

Se analizaron distintos modelos y estrategias para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, considerando sus requerimientos de información cartográfica, edafológica, geológica, y la disponibilidad de información en las bases existentes de datos de la zona.

El primer modelo analizado fue el de Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las micro cuencas Palo, Marín y San Rafaelito aplicado en San Carlos, Costa Rica (Castillo, 2008), donde se cuenta con distintos requerimientos naturales para la aplicación de este modelo, cotejado con la zona de estudio Cuenca Laguna de Bustillos, no fue compatible en 6 de los 11 requerimientos de información (Cuadro1). En la zona no se cuenta con datos de: evapotranspiración, humedad inicial, retención de humedad, densidad aparente, infiltración básica del suelo, intercepción de la lluvia, profundidad de las raíces extractoras de agua, por lo que será necesario su generación posterior si es que el modelo se quiere aplicar localmente.

**Cuadro 1.** Requerimientos e información existente según el modelo.

Requerimientos	Información en la zona de estudio
Textura del suelo	Existe información
Pendiente	Existe información
Tipo de cobertura vegetal	Existe información
Precipitación	Existe información
Evapotranspiración potencial	Información limitada
Humedad inicial	Información limitada
Retención de humedad del suelo	Información limitada
Densidad aparente	Información limitada
Infiltración básica del suelo	Información limitada
Intercepción de la lluvia	Información limitada
Profundidad de las raíces extractoras de agua	Información limitada

El segundo modelo analizado (Noriega, 2005), fue una metodología para la identificación de zonas de recarga hídrica naturales, aplicado a las cuencas de Guatemala. Este método consta de requerimientos naturales para su aplicación (Cuadro 2). Al igual que en el caso anterior,

hubo inconsistencias con: evapotranspiración potencial y real, infiltración, grado de saturación del suelo, escurrimiento, balance hídrico de los suelos, humedad inicial y final del suelo, por lo que se requerirá generar dichos datos.

**Cuadro 2.** Requerimientos e información existente según el modelo.

Requerimientos	Información en la zona de estudio
Precipitación pluvial	Existe información
Precipitación efectiva	Existe información
Evapotranspiración potencial y real	Información limitada
Infiltración	Información limitada
Grado de saturación del suelo	Información limitada
Relieve	Existe información
Estratigrafía geológica	Existe información
Cobertura vegetal	Existe información
Escurrimiento	Información limitada
Balance hídrico de los suelos	Información limitada

El tercer modelo analizado (Matus, Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua, 2009) fue la elaboración de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas

hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. Esta propuesta se basa principalmente en cinco diferentes requerimientos naturales (Cuadro 3). En este caso si hubo los datos requeridos por el modelo.

**Cuadro 3.** Requerimientos e información existente según el modelo.

Requerimientos	Información en la zona de estudio
Pendiente y relieve	Existe información
Tipo de suelos	Existe información
Geología	Existe información
Uso del suelo	Existe información
Cobertura Vegetal	Existe información

El último modelo identificado es un del plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica, aplicado a la microrregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica (Castillo, 2008), este modelo adaptado en este estudio se diferencia de los anteriores

ya que además de tomar requerimientos naturales también toma en cuenta elementos antrópicos (Cuadro 4). En este modelo, al igual que en los modelos 1 y 2, se adoleció de datos, fundamentalmente: fuentes de información local, evaporación, sellado de suelos, drenaje, compactación del suelo.

**Cuadro 4.** Requerimientos e información existente según el modelo.

Requerimientos	Información en la zona de estudio
Tipo de suelo	Existe información
Cobertura de la vegetación	Existe información
Relieve	Existe información
Uso de la tierra/vegetación	Existe información
Tipos de rocas	Existe información
Precipitaciones	Existe información
Fuentes de información local (personas, agricultores)	Información limitada
Temperatura	Existe información
Evaporación	Información limitada
Asfaltado y edificación (sellado de suelos).	Información limitada
Drenaje (por ejemplo, pozos, canales, construcción de grandes lagos artificiales).	Información limitada
Compactación del suelo (por ejemplo, por pisoteo del ganado, uso de compactadoras, drenaje).	Información limitada

b) Modelo seleccionado.

De acuerdo a los resultados de la sección anterior, se seleccionó el modelo propuesto por Matus en el año 2007; aplicado a la subcuenca del río por el centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE).

Este modelo se basa principalmente en elementos como la pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo. Dichos elementos se han cartografiado en la zona de estudio, o bien se cuenta con la posibilidad rápida de mapeo. Uno de los elementos que se tomó en cuenta para seleccionar este modelo, es que fue validado con datos reales, y comparado con otros modelos probados en diferentes partes del mundo. Según reporta la bibliografía, el modelo de Matus presentó una gran semejanza en con los resultados reales, en comparación con los otros (Silva, 2007). Debe enfatizarse que este modelo, es un modelo empírico-conceptual, por lo que únicamente nos da áreas potenciales de recarga. Estas tendrán que verificarse en

campo y hacer las pruebas pertinentes para demostrar la aptitud real de estas áreas (pruebas de suelo, infiltración...etc.).

c) Prueba del modelo en la zona de estudio.

Dada la simplicidad del modelo de Matus (2007), se aplicó en la zona de estudio. Se describen a continuación las variables requeridas por el modelo, y su justificación teórica:

Pendiente y micro relieve.

El relieve influye debido al tiempo de contacto del agua con la superficie, en condiciones planas el agua cae a la superficie y su movimiento será lento lo que dará un mayor tiempo para que esta se infiltre, caso contrario en condiciones accidentadas el agua cae y debido a la inclinación del terreno se desplaza a mayor velocidad pasando más rápido a formar parte del agua de escorrentía (Padilla, 2003). Para la evaluación de los elementos se usó la tabla propuesta por Matus (2007), con su categoría y ponderación respectiva (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según tipo de pendiente.

Pendiente %	Posibilidad de recarga	Ponderación
0 – 6	Muy alta	5
6 – 15	Alta	4
15 – 45	Moderada	3
45 – 65	Baja	2
> 65	Muy baja	1

## Tipo de suelo.

El tipo de suelo está estrechamente ligado con la capacidad de infiltración del agua, tal es así, que entre mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el estado de fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración (Campos, 2010).

Para la evaluación de los elementos se usó tabla propuesta por Matus (2007), con una categoría y ponderación proporcionada en este trabajo a partir de la lectura y reconocimiento de las propiedades y características físicas del tipo de suelo (Cuadro 6) en la cartografía y bibliografía de esta zona (INEGI, 2005).

**Cuadro 6.** Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de suelo.

Unidades de suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Feozems, Rendzinas, Fluvisoles	Muy alta	5
Regosoles, Planosoles	Alta	4
Luvisoles, Yermosoles, Chernozems	Media	3
Rankers, Cambisoles, Xerosoles, Castañozems	Baja	2
Litosoles, Vertisoles, Solonchaks, Solonetz	Muy baja	1

## Tipo de roca

Las características de las rocas que determinan su capacidad de recarga y porosidad y la permeabilidad (Matus, 2007). Las rocas duras con poros finos no favorecen la recarga; por el contrario, las rocas suaves o permeables, con macro poros, fallas o fracturas si favorecen la recarga de los

acuíferos (Matus, 2007). Para la evaluación de los elementos se usó tabla propuesta por Matus (2007), con una categoría y ponderación aplicada al caso local, a partir del reconocimiento de las propiedades texturales y físicas del tipo de roca, en la lectura de mapas e información local (Cuadro 7) (CONAGUA, 2009).

**Cuadro 7.** Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.

Rocas	Posibilidad de recarga	Ponderación
Aluvial, Eólico	Muy alta	5
Arenisca-Conglomerado	Alta	4
Conglomerado	Media	3
Andesita, Granodiorita, Riolita toba acida	Baja	2
Basalto	Muy baja	1

### Uso de suelo

El uso de la tierra es muy importante cuando se identifican las zonas de recarga hídrica, dependiendo de su intensidad de uso, manejo y prácticas se podrá garantizar el potencial de recarga, su aprovechamiento y calidad de agua almacenada (Faustino

2006). Para la evaluación de los elementos en este trabajo se usó la tabla propuesta por Matus (2007), con una categoría y ponderación proporcionada en este trabajo a partir de la lectura y reconocimiento de las propiedades y características físicas de uso de suelo (Cuadro 8) (FAO, 2010).

**Cuadro 8.** Ponderación de posibilidad de recarga hídrica según el uso del suelo.

Usos de suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosque de pino, Bosque de encino, Bosque pino-encino, Bosque de encino-pino, Chaparral.	Muy alta	5
Pastizal natural, Pastizal inducido.	Alta	4
Agricultura temporal, Agricultura riego.	Media	3
Zona urbana.	Baja	0.5

## Cobertura vegetal

La cobertura de suelo es un factor que influye en la infiltración del agua, ya que permite un mayor contacto con el suelo, disminuye la velocidad de la escorrentía, la erosión y el impacto de la gota de lluvia (Matus, 2007). Para la evaluación de los

elementos se usó la tabla propuesta por Matus (2007), con su categoría y ponderación respectiva (Cuadro 9), que fue totalmente aplicable en la zona de estudio, dada la existencia de cartografía generada previamente en estudios locales (Bravo 2012).

**Cuadro 9.** Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal.

Cobertura vegetal permanente.	Posibilidad de recarga	Ponderación
>80	Muy alta	5
70 – 80	Alta	4
50 – 70	Moderada	3
30 – 50	Baja	2
<30	Muy baja	1

d) Aplicación del modelo propuesto por Matus (2007).

El modelo elegido, correspondiente a Matus 2007, involucró el cálculo de la ecuación (Ecuación 1), que se obtuvo con base en los ponderadores obtenidos para cada elemento del medio físico, de acuerdo a su distribución espacial en la zona Cuenca Laguna Bustillos. Con base en los resultados obtenidos de la evaluación de cada uno de los elementos, se sustituyeron los valores obtenidos en la ecuación propuesta por Matus (2007):

$$ZR = 0.27(\text{Pend}) + 0.23(\text{Ts}) + 0.12(\text{Tr}) + 0.25(\text{Cve}) + 0.13(\text{Us})$$

Ecuación 1: Ecuación para determinar el potencial de recarga hídrica

Fuente: Matus, O. (2007). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Nicaragua.

Dónde:

Pend: Pendiente.

TS: Tipo de suelo.

TR: Tipo de roca.

CVE: Cobertura vegetal permanente.

US: Usos del suelo.

Los resultados generados en esta ecuación se reclasificaron con base en el arreglo propuesto por (Vásquez, 2008) (Cuadro 10),

determinando así, cuáles son las posibilidades reales en la zona de estudio:

**Cuadro 10.** Potencial de recarga hídrica según el modelo.

Posibilidad de recarga	Rango
Muy alta	4.1- 5
Alta	3.5 – 4.0
Moderada	2.6 – 3.49
Baja	2 – 2.59
Muy baja	1 – 1.99

Derivado de este modelo, y su representación espacial en el sistema de información geográfica que se construyó en este ejercicio, se presentan cinco mapas: 1) pendiente, 2) tipo y uso de suelo, 3) cobertura vegetal y 4) tipo de roca, clasificados, dependiendo a sus posibilidades de que se realice la recarga hídrica, según la ponderación de los atributos. Requeridos por el modelo.

Estos mapas tienen una escala de 0 a 5, donde 0 es nula la posibilidad a que se pueda efectuar la recarga, y 5 es la más alta posibilidad a que se realice la recarga hídrica en el lugar (Figura 2).

El traslape de estos mapas, generó un problema de representación cartográfica, pues la zona de estudio es tan grande, y algunas fuentes de información tan detalladas, que la superposición arroja millones de polígonos. Esto hizo necesario ponderar cada una de las capas en unidades espaciales más grandes, homogéneas y manejables cartográficamente. Por esta razón se utilizó un mapa de subcuencas de la zona de estudio, obtenido mediante métodos de interpolación espacial a partir de un Modelo Digital de Elevación del Terreno de resolución media (Bravo, 2010).

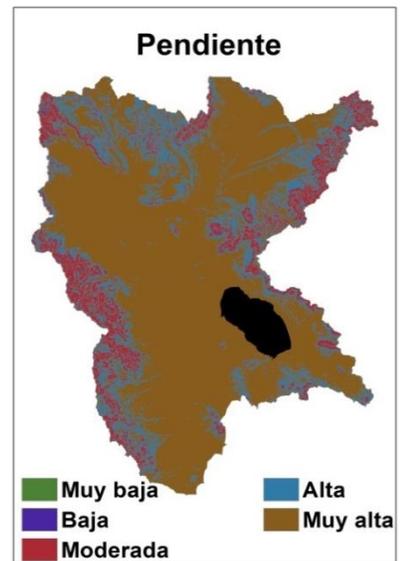
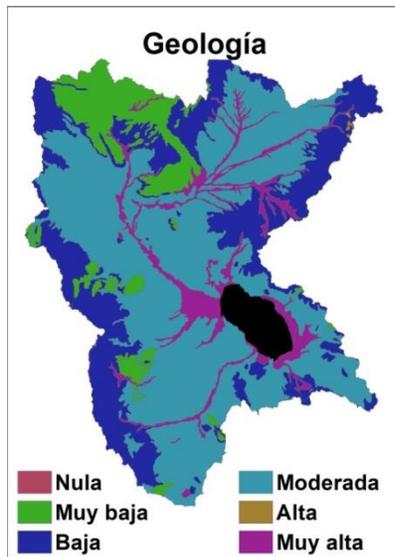
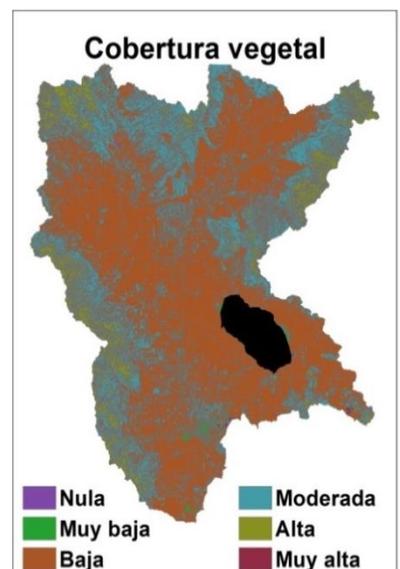
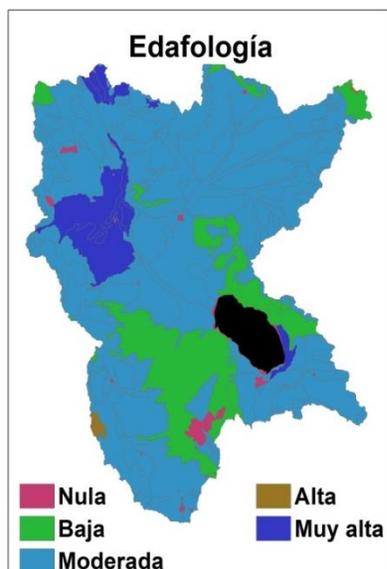
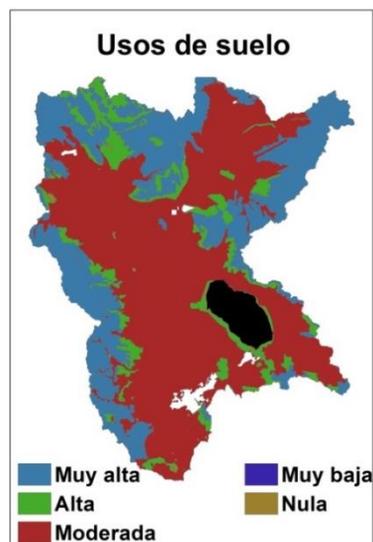


Figura 2. Ponderación de permeabilidad en las capas: Geología, Pendiente, Usos de suelo, Edafología y Cobertura vegetal utilizadas en el modelo de Matus (2007)



La ponderación de cada capa a nivel subcuena, se realizó con base en la siguiente ecuación:

$$V = (\sum_{i=1}^n W_i * F_i) / \sum_{i=1}^n W_i$$

Dónde:

V es el valor alcanzado por la subcuena para el factor ambiental evaluado (F).

W: es el ponderador para el factor ambiental

F, en función del área que representa dentro de la subcuena.

W: es la sumatoria de pesos individuales, en este caso 1.

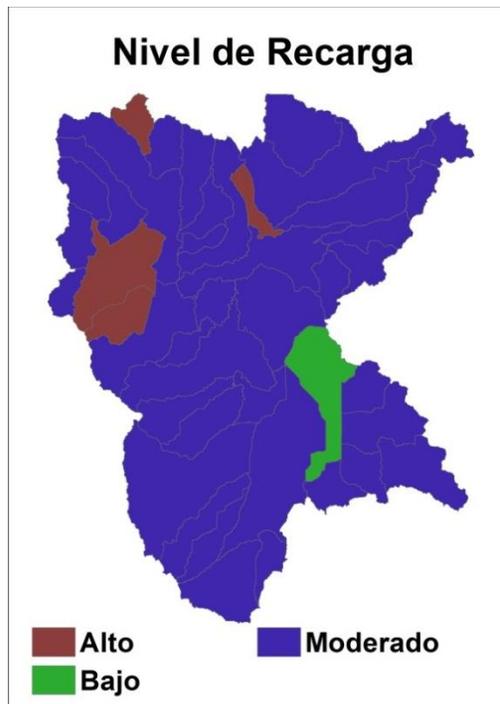
A partir de esta ponderación, el mapa resultante de traslapar todas las capas, se reordenó con los rangos propuestos Matus (2007) (Cuadro 11) del cual se obtuvieron tres categorías diferentes alta, moderada y baja posibilidad de recarga hídrica.

**Cuadro 11.** Potencial de recarga hídrica rangos obtenidos.

Posibilidad de recarga	Rango
Alta	3.5 – 4.09
Moderada	2.6 – 3.49
Baja	2 – 2.59

Espacialmente estos rangos se distribuyen así (figura 3):

Figura 3. Mapa de potencial de recarga hídrica de cuenca laguna de bustillos.



Del mapa anterior se pueden apreciar tres diferentes categorías de posibilidad de recarga hídrica las cuales son alta, moderada y baja posibilidad de recarga en la cual se puede observar que la categoría que predominó es la moderada ya que cuenta con un 89.09% del área total de la zona de estudio, seguida por la categoría de alta posibilidad de ocurrencia de recarga ya que cuenta con un 7.35% del área total, después se encuentra la categoría de baja posibilidad de recarga con un 3.56% de la área total de la cuenca.

Es importante señalar que las diferencias de escala en la información cartográfica que alimenta al modelo elegido, generan un problema de representación de los resultados. Idealmente, el modelo debería alimentarse con datos de la misma escala, pero estos no están disponibles para la zona. Datos de mayor escala tendrán que generarse en ejercicios posteriores, para incrementar la resolución requerida. Esto se requiere en particular para las capas de geología, edafología.

No obstante esta dificultad, los resultados generados son útiles para diferenciar espacialmente las áreas de la cuenca que tendrían prioridad en términos de su hidrofuncionalidad para la recarga del acuífero. Por ejemplo, en estas zonas se

pueden iniciar las estrategias específicas de gestión del acuífero, o bien se les puede dar prioridad para la generación de datos cartográficos comparables. Esto último en particular, si se carece de los recursos financieros para los trabajos asociados con la generación de esta cartografía (trabajo de campo, muestras cuando así se requiera, trabajo de gabinete, etc.) en toda la cuenca.

#### **4. CONCLUSIONES.**

La identificación de zonas de recarga hídrica es de suma importancia, ya que es ahí donde el agua se infiltra para recargar los acuíferos subterráneos. Los estudios de los acuíferos pueden ayudar a obtener un proyecto de la recarga exitoso, para esto es necesario que se cuente con una buena planeación además de que estén bien diseñados, operados y sean parte de distintas estrategias para los recursos hídricos (Garduño, 2003).

La identificación de modelos de recarga hídrica implicó una revisión bibliográfica exhaustiva, se encontraron diferentes modelos aplicados con éxito en diferentes lugares del mundo especialmente en lugares con problemas con la escasez del agua, los cuales toman en cuenta factores que intervienen en la retención e infiltración de agua, especialmente factores naturales como

el relieve y el clima, además de diferentes factores antrópicos.

De los insumos cartográficos requeridos por los modelos analizados, se detectó que en la zona se requiere información de mayor detalle en las siguientes capas: edafología y geología.

Se seleccionó un modelo aplicado previamente en otras regiones del mundo. Este es sencillo y práctico, se basa en información disponible para la zona: datos de pendiente, tipo y uso de suelo, tipo de roca y cobertura vegetal.

No obstante los problemas de representación cartográfica derivados de contar con información a escalas muy heterogéneas, el modelo aplicado fue útil para la identificación de las subcuentas con mayor posibilidad de recarga, así como también las áreas que tienen muy bajas posibilidades a que se realice la recarga hídrica.

En general, al nivel de detalle alcanzado, se puede decir que la cuenca de Cuauhtémoc puede clasificarse como buena para una recarga hídrica positiva, pues cuenta con al 96.44% del área total en las categorías moderada y alta posibilidad de recarga. Solo cuenta con contar con un 3.56% del área

total en la categoría de baja posibilidad de recarga hídrica.

Debe enfatizarse que estos resultados derivan de un modelo empírico-conceptual, por lo que tendrán que verificarse en campo y hacer las pruebas pertinentes para demostrar la aptitud real de estas áreas (pruebas de suelo, infiltración...etc). No obstante esto, constituyen una aproximación bastante valiosa para la identificación de zonas de recarga, pues permite dar prioridad a las zonas con mayor potencial para ser utilizadas con este propósito.

## **5. AGRADECIMIENTOS.**

Este trabajo se desarrolló en el marco del Proyecto “Prospección de Indicadores de Paisaje para Evaluar el Impacto Hidrológico de los Cambios de la Cubierta vegetal y el Uso del Suelo en la Región Central de Chihuahua”. Se agradecen los apoyos brindados por PROMEP para el logro de los trabajos planteados.

## **6. REFERENCIAS.**

Arriaga, J. P. (2005). *Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Sibacà, chinique, quichè*. Tesis Magistral, Universidad de San Carlos De Guatemala, Guatemala.

Recuperado de

[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2211.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2211.pdf)

Barkin, D. (2004). *Mexico City's Water Crisis*. Recuperado de [http://www.mediaaccuracy.org/files/pdfs/Mexico\\_Water.pdf](http://www.mediaaccuracy.org/files/pdfs/Mexico_Water.pdf)

Bravo, L. C. (2010). *Prospección de indicadores de paisaje para evaluar el impacto hidrológico de los cambios*. Cuauhtémoc Chihuahua. Protocolo de Investigación para la Convocatoria de Incorporación de Nuevos Profesores de Tiempo Completo (PROMEP-2010),3-15.

Castillo, N. V. (2008). *Plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica en la microregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica*. Tesis Magistral, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Recuperado de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2952e/A2952e.pdf>

Carrasco, W. d. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panama*. Tesis Magistral, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Recuperado de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A7318e/A7318e.pdf>

Cotler, H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Recuperado de <http://www.cibem.org/paginas/img/apa6.pdf>

CONAGUA. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de cuauhtémoc, estado de chihuahua*.

Recuperado de [ftp://ftp.conagua.gob.mx/SISI1610100117809/DR\\_0805-cuauhtemoc.pdf](ftp://ftp.conagua.gob.mx/SISI1610100117809/DR_0805-cuauhtemoc.pdf)

CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México, edición 2011*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>

Custodio, E. (1992). Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. *International Association of Hydrogeologists*, 23-25.

Erives, V., Gracia, A. K., Miramontes, S., Ojeda, L. A., Perez, G., Servin, Y., & Bravo, L. C. (2012). *Cambios de uso del suelo y cobertura vegetal en el centro de Chihuahua: una comparación preliminar entre menonitas y mestizos en la región de cuauhtémoc*. Reunion nacional SELPER-México, 302-306.

FAO. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>

García, L. (1998). *Manejo integrado de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe*. Recuperado de <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=1448889>

Garduño, H. & Nani, M. (2003). *Venezuela: Yacambú, Quíbor – un Proyecto para*

*Integrar la Gestión del Agua Subterránea y el Agua Superficial.* Recuperado de [http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE\\_Spanish\\_CP\\_07.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE_Spanish_CP_07.pdf)

Guzmán Monge, A., & Díaz Hernández, A. (2007). *IDENTIFICACIÓN DE LAS AREAS DE RECARGA ACUIFERA Y ZONAS DE PROTECCION DE LOS MANANTIALES DEL CANTON CENTRAL DE CARTAGO.*

Recuperado de <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponecias2007/AnaGuzman-ArnulfoDiaz.pdf>

Herrera Ibáñez, I. R., Orozco O., E., & Mujica Cervantes, A. (2011). Strategy for the use of the hydric resource underground in a semi-arid area of Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.* 12-18.

INAB (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural.* Manual Técnico. Guatemala.

INEGI. (2005). *Guia para la interpretacion de cartografía geologica.* Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/geolo/GEOI.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/geolo/GEOI.pdf)

INEGI. (2004). *Guías para la Interpretación de Cartografía Edafología.* Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/edafo/EDAFI.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/edafo/EDAFI.pdf)

INEGI. (2009). *Guia para la inerpretacion cartografica uso del suelo y vegetacion.* Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/sueloyveg/1\\_250\\_III/Suelo\\_Vegeta.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/sueloyveg/1_250_III/Suelo_Vegeta.pdf)

Llamas, M. R. (1992). Selected papers on acuífer overexploitation. *Watlands: an important is* in *Hydrogeology*, 69-86.

Martínez, A. R. (2009). Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora. *Revista Digital Universitaria* , 10, 1-19.

Matus, O. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A5974E/A5974E.PDF>

Morgan, L. (2005). Critical Aquifer Recharge Areas. Recuperado de <https://fortress.wa.gov/ecy/publications/publications/0510028.pdf>.

Molina, H. V. (2000). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia experiencias en américa latina. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai128s/ai128s00.pdf>.

Noriega Arriaga, JP.(2005). Determinación de las áreas principales de recarga hídrica natural en la microcuenca del río Sibaca, Chinque, Quiche. Tesis de Ingeniería no publicada, Universidad de San Carlos, Guatemala.

Poliopetro F. (2010). La escasez de agua y la gestión integrada. Recuperada de <http://www.inbo-news.org/IMG/pdf/POLIOPTRO.pdf>.

Rojas, H. B. (2010). Áreas de recarga hídrica de la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafaelito, San Carlos, Costa Rica. Recuperado de <http://cro.ots.ac.cr/rdmcnfs/datasets/biblioteca/pdfs/nbina-13225.pdf>.

Sagovia, J. F. (2003). Estudio de suelos y mapa de peligros de la ciudad de catacaos. Recuperado de [http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios\\_CS/Region\\_Piura/piura/catacaos.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Piura/piura/catacaos.pdf).

Schosinsky, G. y Losilla M.(2000).Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central, (23): 43-55.

Silva, O. M. (2007). Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas,

aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua. Tesis de Magister, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

SMA. (2007). Programa de manejo sustentable del agua para la ciudad de Mexico. Recuperado de [http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/images/Pr ogAgua\\_Cd.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/images/Pr ogAgua_Cd.pdf).

Torres, M. C. (2000). The Dynamics of natural resource degradation: Rural households and women's strategies for survival in northwestern Mexico. <http://www.jstor.org/abstracts/20026788968.html>

Torres, R. L. (1998). Ecología y usos del suelo. Recuperado de <http://www.sogeocol.edu.co/documentos/Ec ologia.pdf>.

Vásquez, N. (2008). Plan de ordenamiento territorial participativo para la gestión de zonas potenciales de recarga hídrica en la microregión hidrográfica Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Tesis de maestría no publicada, CATIE, Turrialba, Costa Rica.