



REVISTA DIGITAL
TLÁLOC AMH

Editorial

- La Iniciativa +7:
Una medida de adaptación para el cambio climático global
- Estadísticas del XXI Congreso Nacional de Hidráulica
- Determinación de los parámetros del modelo de infiltración de Horton a través del modelo de Green y Ampt



Revista Digital Tlaloc AMH

Vol. 48 - Julio-Septiembre 2010

Consejo Editorial

Dr. Felipe Arreguín Cortés
Director

Subdirector General Técnico
Comisión Nacional del Agua
Profesor de asignatura - Posgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Tel: 52 555 1744400
felipe.arreguin@revistatlaloc.mx

Dr. Víctor Alcocer Yamanaka
Coordinador Editorial
Coordinador Editorial - Revista Tlaloc AMH
Coordinador - Coordinación de Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Profesor de asignatura - Posgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Tel: 52 777 3293678 (secretaría)
52 777 3293600 ext. 816 (directo)
yamanaka@tlaloc.imta.mx
yamanaka@revistatlaloc.mx

XXX Consejo Directivo

Presidente
Dr. Humberto Marengo Mogollón

Vicepresidente
Dr. Felipe I. Arreguín Cortés

Primer Secretario
Ing. Fernando Rueda Lujano

Segundo Secretario
Ing. Luis Athié Morales

Tesorero
Ing. Mario López Pérez

Primer Vocal
Ing. Felipe Tito Lugo Árias

Segundo Vocal
Ing. Marco Alfredo Murillo Ruiz

Miembros del Consejo Editorial

Ing. Luis Athié Morales
Comisión Federal de Electricidad

Dr. Moisés Berezowsky
Instituto de Ingeniería de la UNAM

M. en I. Víctor Bourguett Ortiz
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Jaime Collado
Consultor

Dr. Gabriel Echávez Aldape
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería de la UNAM

Dr. Jürgen Mahlknecht
Centro del Agua para América Latina y el Caribe (CAALCA), Tecnológico de Monterrey

Dr. Óscar Fuentes Mariles
Instituto de Ingeniería de la UNAM

Ing. Efraín Muñoz Martín.
Consultor

Dr. Polioptro Martínez Austria
Universidad de las Américas de Puebla

Ing. Roberto Olivares
Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento

Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco
Centro del Agua para América Latina y el Caribe (CAALCA)

Ing. Juan Carlos Valencia Vargas
Comisión Estatal del Agua de Morelos

Tlaloc AMH. Es una publicación trimestral de la Asociación Mexicana de Hidráulica, A.C. Para otros intereses dirigirse a Camino Santa Teresa 187, Colonia Parques del Pedregal, C.P. 14010, México, D.F. Tel. y fax (55) 5666 0835. Certificado de licitud de título núm. 12217 y de contenido núm. 8872. Reserva de derechos al uso exclusivo en trámite. El contenido de los artículos firmados es responsabilidad de los autores y no necesariamente representa la opinión de la Asociación Mexicana de Hidráulica. Ninguna parte de esta revista puede ser reproducida en medio alguno, incluso electrónico, ni traducida a otros idiomas sin autorización escrita de sus editores. Concepto gráfico, diseño y diagramación: M.A.M. Gema Alín Martínez Ocampo.

Contenido

Editorial	5
1. La Iniciativa +7: Una medida de adaptación para el cambio climático global	7
1.1. Introducción	7
1.2. El Efecto Invernadero	8
1.3. El Cambio Climático Global	10
1.4. El Nivel del Mar a Través de los Tiempos	11
1.5. La Iniciativa +7	12
1.6. Medidas Propuestas para Mitigar el Calentamiento Global	13
1.7. Conclusiones	14
1.8. Agradecimientos	14
1.9. Referencias	15
2. Estadísticas del XXI Congreso Nacional de Hidráulica	17
3 Determinación de los parámetros del modelo de infiltración de Horton a través del modelo de Green y Ampt	21
3.1. Introducción	21
3.2. Teoría 22	
3.3. Aplicaciones	32
3.4. Resultados	33
3.5. Conclusiones	37
3.6. Referencias	38





Editorial

Nacida en el año 1994, Tláloc, nuestra revista, se editaba solamente en papel, y como muchas otras instituciones, la Asociación Mexicana de Hidráulica veía limitada su capacidad de reproducir la revista por factores básicamente de orden económico-presupuestario, y muchas veces el número de artículos que se deseaban publicar estaba por encima de la capacidad de edición de la revista. Esta situación obligó a producir tirajes limitados, que se distribuían solamente entre los agremiados de la Asociación que contaban con datos correctos dentro del padrón de la AMH, por lo que muchos ejemplares eran devueltos y llenaban las bodegas de nuestra Asociación. Pero la más grave es que la revista no llegaba a los estudiantes y especialistas no inscritos en la AMH, situación que sin duda limitaba nuestro alcance y excluía a este importante segmento

Posteriormente, se editaba en papel y en forma digital, se podía acceder desde el portal Internet de la AMH. Sin embargo la necesidad de editar en papel seguía imponiendo las limitaciones señaladas, aunadas al tiempo que requiere todo el proceso editorial ; la consecuencia fue que en algunos años se publicaron solamente dos números y se alteró con ello la periodicidad de la revista.

A partir de ahora, con del número 45, la Revista Tláloc tiene su propio portal de Internet (<http://www.revistatlaloc.mx>), de acceso libre y gratuito para todo el público, y solamente se edita en forma digital. De esta manera ampliamos nuestro alcance socio demográfico, con

este nuevo formato cada persona, desde la comodidad de su casa u oficina, podrá leer la revista y en su caso, imprimir los artículos o notas que resulten de su interés.

Algunas de las ventajas que ofrece esta modalidad es que los autores de los artículos tendrán un mayor control sobre los procesos editoriales, ya que pueden ser ellos mismos los que realicen parte de las tareas; no habrá las limitaciones estrictas de espacio que suelen imponer las editoriales; el tiraje no estará limitado; la revista estará disponible para cualquier persona que quiera consultarla; no existirán „números atrasados“ ni devoluciones; se facilitarán los mecanismos de publicidad, en beneficio de universidades, institutos de investigación y empresas; se favorecerá el contacto directo e inmediato con los lectores, pues la inclusión de las direcciones de correo electrónico de los autores permite el debate, la crítica o el comentario; también se fomenta la comunicación entre especialistas en campos afines, pues la red permite localizar fácilmente a personas que trabajan en diversos ámbitos de interés de los lectores.

Cada número estará disponible inmediatamente después de su publicación en el portal Internet y los lectores no necesitan espacio físico para almacenar la revista en papel.

De esta forma, el Comité Editorial de la revista se suma también, una vez más, al cuidado del medio ambiente, mediante la considerable disminución del uso de papel y tinta.

Esperamos con esta nueva etapa de nuestra Revista Tláloc, continuar brindándole la información técnica y contextual que usted espera, con el rigor y seriedad que nos ha caracterizado como editores.

ATENTAMENTE

Dr. Felipe Arreguín Cortés
Dr. Víctor Alcocer Yamanaka

1

La Iniciativa +7: Una medida de adaptación para el cambio climático global

José A. Raynal Villaseñor
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad de las Américas, Puebla
Santa Catarina Mártir
72820 Cholula, Pue., México
Correo electrónico: josea.raynal@udlap.mx

Resumen

Se presenta la Iniciativa +7, la cual está orientada a fungir como una medida de adaptación para el cambio climático global que está en desarrollo actualmente. Ante el futuro posible, a ocurrir a partir del año 2020, del derretimiento total del Polo Norte durante los veranos después de ese año, una consecuencia esperada de este nuevo escenario mundial, será la elevación del nivel medio del mar en 7 metros. En el artículo, se proponen tanto acciones de adaptación para este futuro posible, así como medidas que se pueden tomar en la vida diaria para mitigar la severidad del cambio climático en desarrollo.

1.1. Introducción

El cambio climático global es un fenómeno cada vez más presente en la vida cotidiana de los seres humanos en el Planeta Tierra. Nunca ha habido controversia sobre su existencia en la comunidad científica mundial, la controversia se ha sembrado por las noticias confusas divulgadas en los medios de comunicación internacionales, pero sobre todo nacionales.

El cambio climático global tiene muchas repercusiones en la vida humana, por lo que resultaría imposible atacarlo en toda su dimensión en un espacio tan reducido como éste. Solamente se considerarán las implicaciones que tienen que ver con el derretimiento de las capas de hielo que cubren grandes extensiones de la geografía terrestre. Las extensiones cubiertas por el hielo consideradas en lo que aquí se propone, son aquellas alojadas en el Ártico (Polo Norte) y en Groenlandia, principalmente; sin desestimar las contenidas en la Antártida (Polo Sur).

La elevación del nivel medio del mar es inminente en un futuro cercano, como producto de la intensificación del efecto invernadero y por consiguiente del calentamiento global, que está siendo el factor más importante para generar el cambio climático global en que nos hayamos inmersos. Esta situación que no es ajena ni infrecuente en el Planeta Tierra, ya que esta situación ha ocurrido varias veces en la historia reciente de la Tierra y ha tenido una fluctuación de 120 metros por abajo del nivel medio del mar actual, cuando se han presentado los periodos glaciares, así como 100 metros por encima del nivel medio del mar actual, cuando se han derretido las capas de

hielo producidas por las glaciaciones y además se han tenido periodos muy cálidos producidos por diversas causas, principalmente en periodos de intensa actividad volcánica.

Para contrarrestar los efectos devastadores de una elevación significativa del nivel medio del mar en un futuro tan cercano como lo es el año 2020, se propone una medida de adaptación para el cambio climático global que se denomina la Iniciativa +7.

1.2. El Efecto Invernadero

El efecto invernadero toma su nombre al compararlo con el del proceso térmico que se produce precisamente en un invernadero, ver figura 1, que es una construcción con paredes y techo de vidrio o de cualquier otro material transparente o translúcido, el cual está diseñado para atrapar parte de la radiación de onda larga y producir una elevación de la temperatura interior con respecto a la temperatura exterior del invernadero. Esta estructura que provoca un diferencial térmico con respecto al exterior, es utilizada para cultivar diversos productos vegetales, por ejemplo, permite cultivar y cosechar fresas en Alemania en pleno invierno.

El efecto invernadero es muy fácil entenderlo por medio de un ejemplo cotidiano. Podemos percibir el efecto invernadero al subirnos a nuestro auto -digamos, a las 2:00 ó 3:00 PM-, después de dejarlo expuesto a los rayos del Sol toda la mañana. Cuando nos subimos al auto percibimos que está más caliente en su interior con respecto al espacio exterior que lo rodea, éste es el resultado de un incremento térmico que produce el efecto invernadero.

A escala atmosférica, el efecto invernadero ha existido en la Tierra desde la aparición en el planeta del agua en forma líquida, ver figura 2. El principal Gas de Efecto Invernadero (GEI) es el vapor de agua. Este compuesto, conjuntamente con otros gases como el oxígeno (O₂) y el dióxido de carbono (CO₂), ha producido un ambiente propicio para la aparición y evolución de la vida, sin él la temperatura promedio de la Tierra sería de -18°C y el planeta sería una esfera con cobertura de hielo; en lugar de este escenario, la superficie terrestre tiene una temperatura promedio de 14°C.

El vapor de agua, el CO₂ y otros gases cuyas moléculas tienen momento eléctrico bipolar absorben radiación más fuertemente en la parte

de longitud de onda larga del espectro electromagnético ocupado por la radiación terrestre saliente (onda larga) que en la parte de onda corta ocupada por la radiación solar incidente. Entonces la radiación solar incidente pasa a través de la atmósfera completamente libre mientras que la radiación terrestre emitida desde la superficie de la tierra es absorbida y re-emitida en su paso hacia arriba a través de la atmósfera.

En el efecto invernadero a escala atmosférica, los GEI (vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (NO) y los cloro-fluoro-carbonos (CFCs)), actúan como los cristales en un invernadero.

Los niveles de CO₂, el principal causante del efecto invernadero global actual, han estado creciendo en forma alarmante desde la Revolución Industrial, iniciándose un ascenso vertiginoso desde finales de los años cincuenta hasta la fecha, ver figura 3. Desde la Revolución Industrial y hasta el año 2005 la concentración de CO₂ en la atmósfera se ha incrementado en un 35%, alcanzando un nivel de concentración que no ha sido excedido en los últimos 650,000 años y muy probablemente en los últimos 20 millones

de años, (Van Lenten, 2005). Se estima que las emisiones de CO₂, observadas en el año 2002, serán rebasadas en 63% para el año 2030, (RSC, 2005). El nivel de concentración del metano ha crecido, para el mismo periodo, hasta alcanzar un 250% de incremento, mientras que el óxido nitroso se ha elevado en un 18%.

En la figura 4 se muestran las principales actividades humanas productoras de los GEI. Recientemente, se ha mencionado que un nivel adecuado de la concentración del CO₂ en la atmósfera debiera mantenerse por debajo de las 400 partes por millón para evitar una elevación de la temperatura ambiental superior a 2°C, (RSC (2005). A finales del mes de Septiembre del año 2010 el nivel de

concentración de CO₂ en la atmósfera era del orden de 386.80 ppm y se estima que dicho nivel está subiendo a un ritmo de 2 ppm por año. Esto significa que, de seguir al mismo ritmo, el nivel de 400 ppm de concentración de CO₂ se alcanzará en la atmósfera a finales del año 2016.

1.3. El Cambio Climático Global

El cambio climático global se está produciendo, principalmente por el calentamiento global que están induciendo los así llamados gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son principalmente vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (NO), estos tres últimos han aumentado su concentración en niveles peligrosos a partir de la Revolución Industrial que se produjo a mediados del Siglo XIX. El vapor de agua, siendo el GEI más abundante hasta ahora, es el que ha tenido el efecto más benéfico en el Planeta Tierra, ya que ha hecho que la temperatura promedio del planeta sea 14 °C y no -18 °C si el efecto invernadero no existiera. El efecto invernadero que están produciendo los GEI asociados a las actividades humanas, se acepta que es el mecanismo que está produciendo

Para contrarrestar los efectos devastadores de una elevación significativa del nivel medio del mar en un futuro tan cercano como lo es el año 2020, se propone una medida de adaptación para el cambio climático global que se denomina la Iniciativa +7.

el calentamiento global y por ende el principal causante del cambio climático global (IPCC, 2007 y Showstack, 2009)

1.4. El Nivel del Mar a Través de los Tiempos

Uno de los efectos más temidos del cambio climático es el ascenso del nivel medio del mar, ya que, al subir unos cuantos metros el nivel medio del mar actual, quedarían bajo el agua todas las ciudades costeras del mundo; también habría muchas islas que desaparecerían del mapa terráqueo al ser inundadas por el océano.

El nivel medio del mar ha sido muy cambiante en los últimos 600,000 años, ha estado 100 m por arriba y 120 m por abajo del nivel actual, ver figura 5. El nivel del mar al inicio del Plioceno, hace 12 millones de años, estuvo 380 m por arriba del nivel actual, (Sellers, 1965).

Se ha encontrado que al final de la era glacial más reciente, el mar subió su nivel abruptamente al generarse una ola de más de 100 m de altura, la cual provocó un cambio ascendente del nivel del mar de alrededor de

120 m. Esto provocó que más de 26 millones de km² quedaran bajo las aguas de los océanos y mares. Se sabe que, (RSC, 2005), una elevación de 1°C en la temperatura del agua de mar provocaría el derretimiento del hielo perenne del Polo Norte en un área de 1.5 millones de km².

Un aumento de 3°C en el Polo Norte produciría, a largo plazo, el derretimiento total del hielo de Groenlandia (Rowley et al, 2007). Se ha estimado que, si se derritiera totalmente la capa de hielo que forma a Groenlandia, el mar subiría su nivel en aproximadamente 7 metros, (IPCC, 2007). Hay que enfatizar que el volumen de hielo contenido en Groenlandia es una parte importante del Polo Norte.

Por otro lado, se infiere que, bajo las tendencias actuales, el derretimiento del Polo Norte implicaría una elevación del nivel medio del mar de 7 m por encima del nivel actual, este hecho se consideraba que ocurriría en los veranos a partir del año 2040. Actualmente, la fecha anterior se ha considerado muy optimista y se espera que entre el año 2013 y el año 2030 ocurra el primer derretimiento total del Polo Norte en los veranos, (National Geographic, 2008). En la figuras 6 y 7, se presentan mapas de inundación de las zonas costeras del sur del

Golfo de México y el Mar Caribe donde se muestran en rojo las áreas continentales que quedarían sumergidas si se presentara una subida del nivel medio del mar en 7 m con respecto al nivel medio del mar actual. Como puede observarse, México perdería gran parte de Cozumel, la isla más grande del territorio nacional, gran parte de las zonas costeras de la península de Yucatán y de los estados de Veracruz, Campeche y Tabasco, se verían muy afectados por este cambio del nivel del mar, producto del calentamiento global.

1.5. La Iniciativa +7

La Iniciativa +7 consiste en identificar primero, cuáles serían las áreas afectadas de México ante una muy probable elevación de 1 metro, 3 metros, 5 metros y 7 metros, ver las figuras 8, 9, 10 y 6, respectivamente, en el nivel medio del mar actual, dado que ésta última es la elevación en el nivel medio del mar que se produciría si el Ártico se derritiera totalmente en el verano, situación prevista que va a ocurrir a partir del año 2020; o bien el derretimiento total de Groenlandia o de una porción importante de la Antártida. La Iniciativa +7 considera como un segundo nivel de medidas, la colocación de avisos de alerta a lo

largo de cota +7 metros en las zonas más vulnerables a sufrir los efectos de la elevación del nivel del mar. El tercer nivel de acción de la Iniciativa +7 será el desalojo de las personas que habiten las zonas de peligro identificadas en la primera etapa por la Iniciativa +7.

La Iniciativa +7 consiste en las siguientes acciones:

- 1) Identificar los sitios de mayor riesgo por inundación marítima en zonas costeras de México.
- 2) Zonificar todas las áreas costeras de acuerdo a su riesgo de inundación y considerando el nivel de marea alta.
- 3) A medida que se materialice un incremento mayor que el pronosticado por el IPCC para finales de siglo XXI, colocar signos de advertencia en zonas de inundación inminente.
- 4) En caso de ser necesario, desalojar a la población de zonas con alto riesgo de inundación inminente.
- 5) Detectar las zonas sujetas a inundación continua y/o permanente y clasificarlas como inhabitables con la declaratoria de áreas naturales protegidas.
- 6) Reubicar a la población que está habitando las zonas suje-

tas a inundación continua y/o permanente

- 7) Desarrollar y aprovechar las áreas naturales protegidas, producto de la declaratoria citada previamente, para una explotación racional por parte de la población desalojada de esas áreas, en el caso de las llanuras costeras de Tabasco y Campeche podría haber varias Xcaret y Xel-ha.
- 8) Invertir los recursos económicos que se destinarían como apoyo a damnificados por inundaciones, provenientes del FONDEN, en la creación de fuentes de empleo.

1.6. Medidas Propuestas para Mitigar el Calentamiento Global

Ante el posible futuro planteado previamente, es necesario tomar acciones como personas de la población civil para mitigar los efectos del calentamiento global y tratar de hacer que el cambio climático global no sea tan adverso para las futuras generaciones. Una lista no exhaustiva de acciones que se pueden tomar en la vida diaria son:



- 1) En lo posible adquirir un auto híbrido. En México ya hay dos posibilidades para hacer este cambio tecnológico, una posibilidad es el Toyota Prius híbrido, considerado el mejor auto híbrido mundial. Otra posibilidad es adquirir un Honda Civic híbrido.
- 2) Cambiar todos los focos de filamento incandescente de nuestras casas por focos de luz fría. Los focos de luz incandescente consumen hasta un 80% de la electricidad en sólo calentar el filamento incandescente.
- 3) En lo posible cambiar los aparatos eléctricos domésticos por aparatos más modernos y que utilicen más eficientemente el consumo de energía.
- 4) Reducir el consumo de energía al hacer un uso más eficiente del agua caliente en nuestras casas.
- 5) Reducir el consumo de energía al hacer un uso más eficiente de la calefacción y el aire acondicionado en nuestras casas.

1.7. Conclusiones

Ante la inminencia de la elevación del nivel del mar por encima del nivel actual, hasta en una elevación de 7 metros por arriba del nivel medio

del mar actual, producto del calentamiento global y su consiguiente influencia en el derretimiento de los hielos polares, es urgente implementar procedimientos de zonificación y delimitación de zonas en grave de peligro de inundación marítima; así como establecer planes de contingencia que permitan un desalojo ordenado y oportuno de las zonas de peligro para la población asentada en los lugares más vulnerables a sufrir inundaciones permanentes por la elevación del nivel del mar. Si no tomamos, al menos, las medidas indicadas previamente estaremos haciendo posible el futuro que se ha planteado, comprometiendo a las futuras generaciones a vivir en un planeta muy diferente al que nos tocó disfrutar a lo largo de nuestras vidas. Hay que recordar siempre que no somos propietarios de los recursos naturales del planeta, somos sólo usuarios de estos recursos y tenemos la obligación moral de heredarlos a las futuras generaciones por lo menos en el mismo nivel de calidad con que los recibimos de la generación anterior.

1.8. Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad de las Américas, Puebla por las

facilidades que se otorgaron para hacer posible la publicación de este artículo.

1.9. Referencias

- FLOOD MAPS, Flood Maps, 2010, [consultado 2 de Octubre de 2010], Disponible para World Wide Web:
<http://flood.firetree.net>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 4rd. Assessment, Report, 2007, [consultado 2 de Octubre de 2010], Disponible para World Wide Web: http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/index_en.htm
- NATIONAL GEOGRAPHIC, North Pole May Be Ice-Free for First Time This Summer, 2008, [consultado 2 de Octubre de 2010], Disponible para World Wide Web:
<http://news.nationalgeographic.com/news/2008/06/080620-north-pole.htm>
- REPORT OF THE STEERING COMMITTEE (RSC), International Symposium on the Stabilisation of Greenhouse Gases, Exeter, Inglaterra, 2005, 16 pp
- ROWLEY, R. J., KOSTELNICK, J. C., BRAATEN, D., LI, X. Y MEISEL, J., Risk of Rising Sea Level to Population and Land Area, EOS, Vol. 88, No. 9, 27 February, 2007, 105 pp
- SELLERS, William D., Physical Climatology, The University Chicago Press, Chicago, Illinois, EUA, 1965, págs. 197-228 pp
- SHOWSTACK, R., Climate Change Now Apparent and Unequivocal, New Report Warns, EOS, Vol. 90, No. 26, 30 June, 2009, 223 pp
- UNEP-GRID-Arendal, Climate, 2007, [consultado 2 de Octubre de 2010]. Disponible para World Wide Web:
<http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3058.aspx>
- VAN LENTEN, C., The Slow-Motion Tsunami: How Climate Change Could Change the World, Update, The New York Academy of Sciences Magazine, Marzo del 2005, 2-7 pp
- WIKIPEDIA, Carbon Dioxide, 2010, [consultado 2 de Octubre de 2010]. Disponible para World Wide Web:
http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide



2

Estadísticas del XXI Congreso Nacional de Hidráulica

Moisés Berezowsky Verduzco
Director Técnico del Congreso

Como cada dos años, en octubre realizamos nuestro congreso nacional; esta vez fuimos recibidos por la Universidad Autónoma de Guadalajara. El evento tuvo una asistencia de más de 900 congresistas, de los cuales, 300 fueron estudiantes. Durante el congreso se presentaron cuatro conferencias magistrales, 162 artículos técnicos y tres mesas redondas.

A continuación se presentan algunas cifras sobre los autores de las ponencias; el análisis se hace principalmente tomando en cuenta los datos del primer autor. Se espera que su vista rápida permita obtener una perspectiva sobre el gremio.

El Comité Editorial recibió y revisó 188 artículos y aceptó 162. Se tiene un índice de aceptación del 86 por ciento. La causa mayor de rechazo de trabajos fue el no presentar el texto en el formato indicado, o sólo enviar el resumen sin el trabajo completo. Aunque es difícil clasificar algunos de los trabajos, dicho Comité los dividió como sigue: 30 en Investigación, 10 en Docencia, 33 en Obras hidráulicas, 23 en Hidrología, 20 en Hidráulica urbana, 18 en Fluvial y marítima, 16 en Calidad del agua y cambio climático, y 16 en Gestión del recurso.

En cuanto a su distribución geográfica, se recibieron artículos de 18 entidades del país, incluido el Distrito Federal, ver Tabla 2.1.

Una mujer es primera autora en 18 por ciento de los trabajos, y 26 por ciento fueron escritos y presentados por estudiantes. En la Figura 2.1 se muestran las dependencias de origen de los autores.

Tabla 2.1. Entidad de origen de los artículos

Entidades	Artículos	Porcentaje
DF	65	40.0
Querétaro	49	30.1
Tamaulipas	11	6.7
Baja California	7	4.3
Sinaloa	6	3.7
S.L.P	4	2.5
Puebla	3	1.8
Guerrero	3	1.8
Chiapas	2	1.2
Jalisco	2	1.2
Tabasco	2	1.2
Morelos	2	1.2
Veracruz	1	0.6
Michoacán	1	0.6
Nuevo León	1	0.6
Nayarit	1	0.6
Chihuahua	1	0.6
Edo. de México	1	0.6
Total	162	

Figura 2.1. Dependencias participantes en el congreso

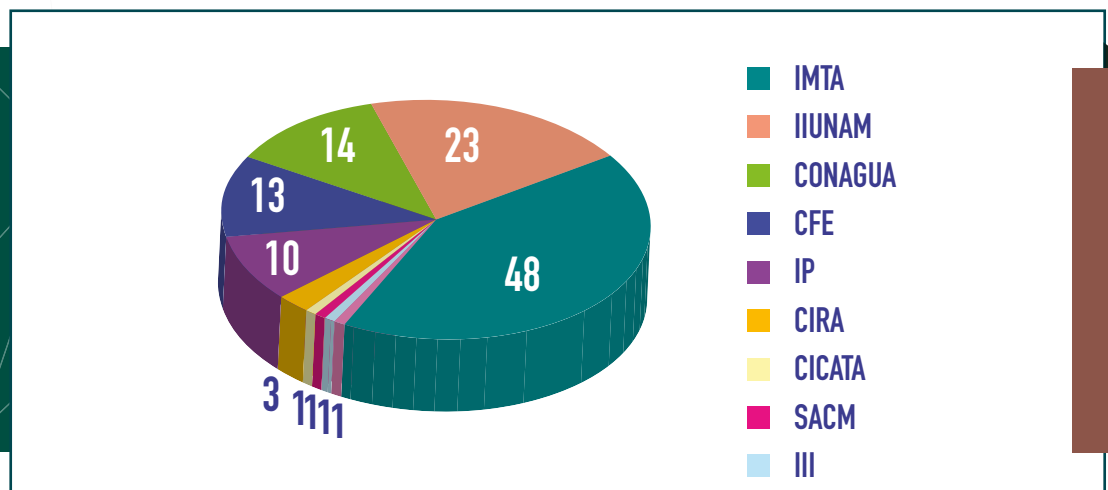


Tabla 2.1. Entidad de origen de los artículos

Universidad	Artículos	Porcentaje
UNAM		44.9
UASLP	35	14.1
IPN	11	7.7
UAT	6	5.1
UAEM	6	2.6
UJAT	4	2.6
UABC	2	2.6
UMICH	2	2.6
UAM	2	1.3
ITCh	1	1.3
UDLAP	1	1.3
UNACH	1	1.3
UAG	1	1.3
UAQ	1	1.3
UAZ	1	1.3
UACH	1	1.3
UANL	1	1.3
ITT	1	1.3
Total	78	

Como es de esperarse, dado su tamaño, el IMTA tiene un rol muy activo con participación en 48 por ciento de los artículos, mientras que el Instituto de Ingeniería participa en 23 de los 35 trabajos de la UNAM.

¿Qué falta por hacer? La AMH es una organización gremial de ingenieros relacionados con el sector hidráulico. El gremio decide cómo organizarse. Creo que debemos facilitar su participación en foros como este. Habrá que aumentar la promoción de la AMH en estados como Guerre-

ro, Oaxaca, Coahuila, Sonora; extraña la ausencia de estados de la zona central del país, como Hidalgo y Guanajuato. Además, habría que fomentar una mayor participación de CONAGUA, CFE, DDF, y las empresas de consultoría, sobre todo dentro de sus organismos regionales, y estatales. Finalmente, se buscaría que los estudiantes no solo asistan sino que participen primero escribiendo más, y segundo durante el evento con sus comentarios y propuestas.



3

Determinación de los parámetros del modelo de infiltración de Horton a través del modelo de Green y Ampt

David Zúñiga Malpica

Instituto Tecnológico de Zacatepec

M. en I. Xóchitl Peñaloza Rueda

Especialista en Hidráulica, Subdirección de Asistencia Técnica Operativa, Dirección Local Michoacán, Comisión Nacional del Agua.

J.C. García-Salas

Gerente Técnico. Infraestructura Hidráulica y Servicios, S.A. de C.V. Profesor de la Especialidad de Hidráulica Urbana de la Universidad Autónoma de Guadalajara.

Carlos Fuentes,

Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.

Felipe Zataráin

Especialista en Hidráulica, Coordinación de Riego y Drenaje, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

3.1. Introducción

La infiltración del agua en el suelo es parte importante del ciclo hidrológico. Es a través de este proceso que el agua está disponible para las raíces de las plantas, y que los acuíferos reciben una parte de su recarga. En términos generales, la infiltración es primordial para proyectos de gestión integral de cuencas, drenaje urbano, inundaciones, riego, drenaje agrícola, entre otros. En la gestión integral de cuencas la infiltración es un elemento para la realización de los balances. En drenaje urbano sirve para estimar los volúmenes de escurrimiento así como sus valores máximos, permitiendo el dimensionamiento de infraestructura para el control de escurrimientos ordinarios y para la estimación del riesgo por inundación. En el caso de sistemas de riego por gravedad, el caudal que debe utilizarse en un surco o en una melga para aplicar uniformemente la lámina de riego deseada depende esencialmente de parámetros de infiltración. Para

sistemas de riego presurizado, tales como aspersion o goteo, la velocidad de infiltración del agua en el suelo es determinante en la selección de caudales en los emisores evitando así el escurrimiento superficial del agua. En el caso de proyectos de drenaje agrícola, la fenomenología de la infiltración es importante en la medida en que ésta constituye el mecanismo de entrada del agua en el suelo y una parte fundamental de los balances hidrológicos.

La selección de parámetros para caracterizar el proceso de infiltración puede impactar de manera sustancial el diseño de infraestructura hidráulica. Actualmente, el ingeniero dispone de modelos con diferentes niveles de complejidad para estimar la infiltración. Entre los modelos mayormente utilizados destacan los modelos de Green y Ampt, (1911) y de Horton (1940). En el caso del modelo de Horton no se cuenta con relaciones que permitan estimar sus parámetros a partir de propiedades de textura, estructura y contenido de materia orgánica de los suelos. Por su parte, los parámetros de la ecuación de Green y Ampt han sido relacionados con las características hidrodinámicas de los suelos, y éstas a su vez han sido estimadas a partir

de las principales propiedades de los mismos (Rawls et al., 1982; Rawls et al., 1983).

En el presente artículo se presenta una metodología de parametrización de la ecuación de Horton a través del modelo de Green y Ampt.

3.2. Teoría

La variación en el tiempo del volumen infiltrado de agua por unidad de superficie del suelo, o lámina infiltrada I (t), ha sido sujeta de varias investigaciones y discusiones técnicas alrededor de diferentes modelos o ecuaciones. Por ejemplo las derivadas de la ley de Darcy (1856) como las ecuaciones de Green y Ampt (1911), Philip (1957), Talsma y Parlange (1972), Smith y Parlange (1978), Parlange et al. (1982), Parlange et al. (1985), Haverkamp et al. (1990), Fuentes et al. (2001) o las ecuaciones de base empírica como la de Kostiakov (1932) y la ecuación de Horton (1940). Esta última largamente utilizada en hidrología de superficie.

Rawls et al. (1982, 1983) estiman las características hidrodinámicas de los suelos a partir de la textura y contenido de materia orgánica con técnicas de regresión múltiple. Las consi-

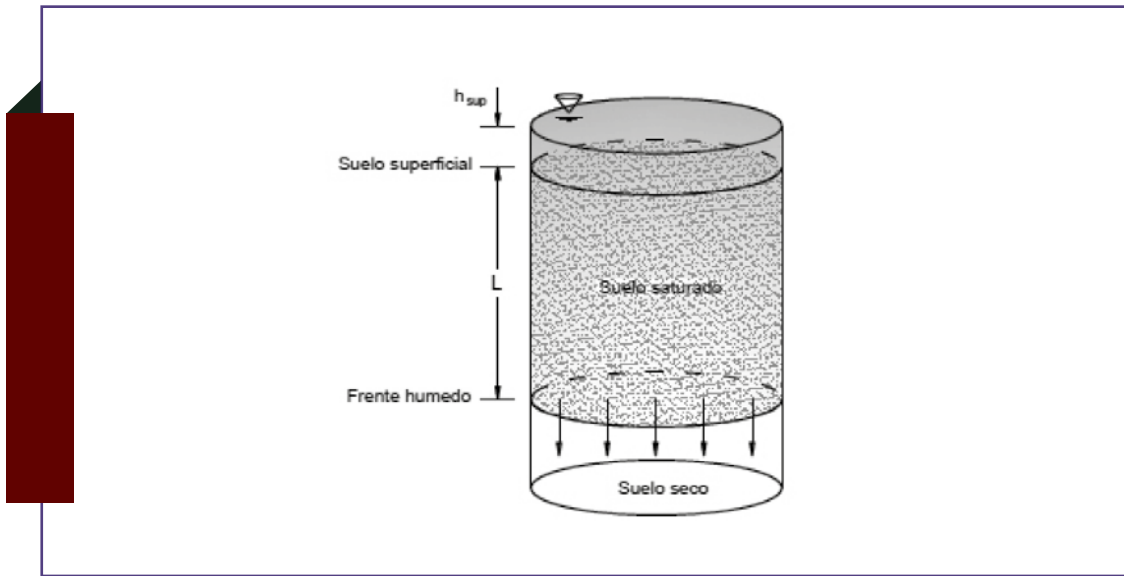


Figura 3.1.
Perfil de
humedad en
forma de pistón

deraciones teóricas que permiten asentar que la ley de Green y Ampt es una solución extrema de la ecuación de infiltración Fokker-Planck (Parlange et al., 1982); han permitido relacionar los parámetros de la ecuación de Green y Ampt con las propiedades básicas de los suelos.

La ecuación de la infiltración de Green y Ampt (1911) resulta de la aplicación de la ley de Darcy (1856) al suponer que el perfil de humedad tiene la forma de un pistón.

Para la velocidad de infiltración es la siguiente:

$$q(t) = K_s \left[1 + \frac{\lambda}{I(t)} \right] \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

- q = Velocidad de infiltración
- K_s = Conductividad hidráulica saturada
- I = Lámina infiltrada acumulada
- t = Tiempo
- λ = Factor de succión-almacenamiento

El factor de succión-almacenamiento es igual a:

$$q(t) = K_s \left[1 + \frac{\lambda}{I(t)} \right] \quad \text{Ecuación 3.2}$$

- h_f = Velocidad de infiltración
- h_{sup} = Presión en a superficie
- $\Delta\theta$ = Déficit de humedad

A su vez, el déficit de humedad es igual a:

$$\Delta\theta = \theta_s - \theta_o \quad \text{Ecuación 3.3}$$

- θ_s = Contenido de humedad saturada
- θ_o = Contenido de humedad inicial

$$I(t) = \int_0^t q(\bar{t}) d\bar{t} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde \bar{t} es una variable de integración. Ello implica que

$$q(t) = \frac{dI(t)}{dt} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Considerando que el factor de succión-almacenamiento λ es independientemente del tiempo, es decir que la carga sobre la superficie es constante, al resolver la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.4 lo largo del dominio de integración, se obtiene la ecuación implícita de la lámina infiltrada acumulada.

Ecuación 3.6

$$I(t) = K_s t + \lambda \ln \left[1 + \frac{I(t)}{\lambda} \right]$$

Ecuación 3.7

$$I(t) = S\sqrt{t} + At + O(t^{3/2})$$

donde:

- S = Sorbibilidad con $S^2 = 2K_s \lambda$ (Philip, 1957)
- A = Primer término difusivo-convectivo
con $A = \frac{2}{3} K_s$

Análogamente, para la velocidad de infiltración la serie de Taylos es igual a:

Ecuación 3.8

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + A + O(\sqrt{t})$$



Las series mostradas en la Ecuación 3.7 y Ecuación 3.8 son convergentes hasta tiempos del orden del tiempo gravitacional expresado definido como (Philip, 1969):

$$t_{grav} = \left(\frac{S}{K_s}\right)^2 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Es importante destacar en que el tiempo gravitación que rigen el proceso de infiltración son iguales (Philip, 1969)

Por otra parte, el comportamiento de la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.6 es asintótico cuando $t \rightarrow \infty$. Para la velocidad de infiltración este comportamiento es igual a:

$$q(t) = K_s + \frac{\lambda}{t} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Por su parte, el comportamiento asintótico para la lámina infiltrada es:

$$\text{Ecuación 3.11}$$

$$I(t) = K_s t + \lambda n \left(\frac{K_s}{\lambda} t\right)$$

La Ecuación 3.1 y Ecuación 3.6 en forma adimensional son, para el caso de la velocidad de infiltración:

$$\text{Ecuación 3.12}$$

$$q^*(t^*) = 1 + \frac{1}{I^*(t^*)}$$

La forma adimensional para la lámina infiltrada es:

$$\text{Ecuación 3.13}$$

$$I^*(t^*) = t^* + 1n[1 + I^*(t^*)]$$

donde:

$$I^*(t^*) = \frac{I(t)}{\lambda} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$q^*(t^*) = \frac{q(t)}{K_s} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$t^* = \frac{t}{\tau} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

La variable τ representa la relación entre el factor de succión-almacenamiento y la conductividad hidráulica, siendo igual a:

$$\tau = \frac{\lambda}{K_s} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Para el caso de tiempos cortos el comportamiento adimensional del modelo de Green y Ampt (1911) tanto para la velocidad de infiltración como para la lámina infiltrada, es el siguiente:

$$\text{Ecuación 3.18}$$

$$q^*(t^*) = \frac{S^*}{2\sqrt{t^*}} + A^* + O(\sqrt{t^*})$$

Ecuación 3.19

$$I^*(t^*) = S\sqrt{t^* + A^*t^*} + O(t^{*3/2}),$$

con $S^* = 2, A^* = \frac{2}{3}$

Análogamente, el comportamiento asintótico (cuando $t \rightarrow \infty$):

$$q^*(t^*) = 1 + \frac{1}{t^*} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

$$r^*(t^*) = t^* + 1n(t^*) \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Considerando lo anterior, se tiene que:

$$\lim_{t^* \rightarrow 0} q^*(t^*) = \infty \quad \text{Ecuación 3.22}$$

$$\lim_{t^* \rightarrow \infty} q^*(t^*) = 1 \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Es decir_

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = K_s) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

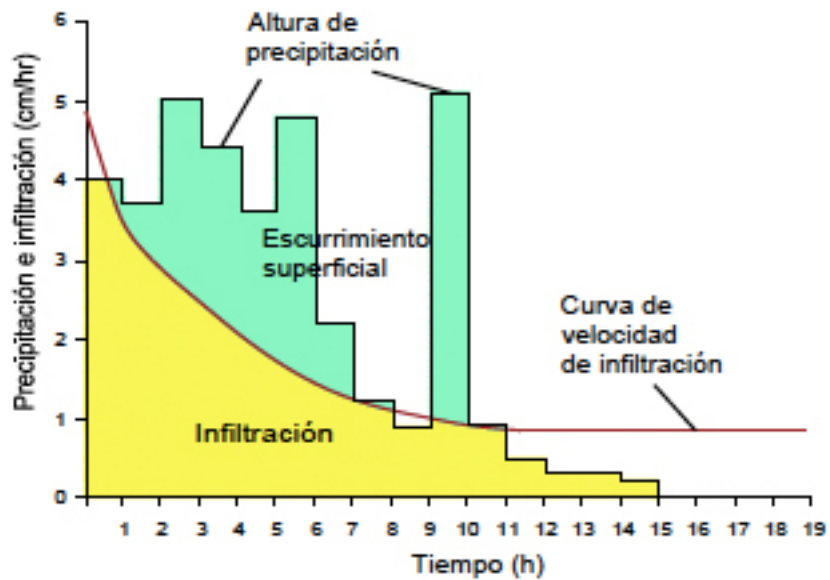
Por otra parte, la ecuación de Horton (1940) considera que la variación negativa en la velocidad de infiltración es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad de infiltración actual q y la velocidad de infiltración final q_∞ (ver Figura 2).

Por lo tanto, la velocidad de infiltración según el modelo de Horton (1940) es la siguiente:

Ecuación 3.25

$$q(t) = q_\infty + (q_0 - q_\infty) \exp(-kt)$$

Figura 3.2. Curva de velocidad de infiltración



Al realizar la inspección de la Ecuación 3.25 se observa lo siguiente:

$$q_o = \lim_{t \rightarrow 0} q(t) \quad \text{Ecuación 3.26}$$

$$q_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} q(t) \quad \text{Ecuación 3.27}$$

donde:

- k = Coeficiente de decaimiento
- q_o = Velocidad de infiltración inicial
- q_∞ = Velocidad de infiltración final
- t = Tiempo

La combinación de la Ecuación 3.4 y Ecuación 3.25 conduce a:

Ecuación 3.28

$$I(t) = q_\infty + \frac{q_o - q_\infty}{k} [1 - \exp(-kt)]$$

Analizando el comportamiento de la Ecuación 3.25 para tiempos cortos ($t \rightarrow \infty$)

Ecuación 3.29

$$q(t) = q_o - (q_o - q_\infty)kt + O(t^2)$$

Análogamente, la serie de Taylor en t de la lámina infiltrada, dada por la Ecuación 3.28, para tiempos cortos es:

Ecuación 3.30

$$I(t) = q_o t - \frac{1}{2}(q_o - q_\infty)kt^2 + O(t^3)$$

Por otra parte, el comportamiento de la Ecuación 3.25 y Ecuación 3.28 es asintótico cuando ($t \rightarrow \infty$) en ambos casos. Para la velocidad de infiltración el comportamiento es igual a:

$$q(t) = q_\infty \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Para la lámina infiltrada el comportamiento asintótico es:

$$I(t) = q_\infty t + I_o, \quad \text{Ecuación 3.32}$$

donde:

$$I_o = \frac{q_o - q_\infty}{k} \quad \text{Ecuación 3.33}$$

Considerando las variables adimensionales definidas por la Ecuación 3.14, Ecuación 3.15 y Ecuación 3.16 se obtienen las ecuaciones adimensionales de la velocidad de infiltración y la lámina infiltrada del modelo de Horton expresadas de la siguiente forma:

Ecuación 3.34

$$q^*(t^*) = q_\infty^* + (q_o^* - q_\infty^*) \exp(-k^* t^*)$$

Ecuación 3.35

$$I^*(t^*) = q_\infty^* t^* + \frac{q_o^* - q_\infty^*}{k^*} [1 - \exp(-k^* t^*)]$$

donde:

$$q_o^* = \frac{q_o}{K_s} \quad \text{Ecuación 3.36}$$

$$q_\infty^* = \frac{q_\infty}{K_s} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

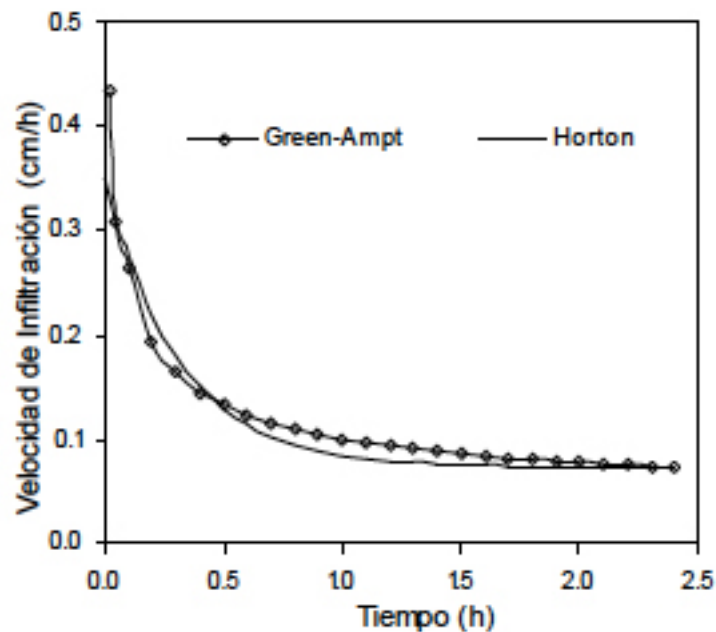
$$k^* = k \frac{\lambda}{K_s} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

Tal como se ha demostrado en este artículo, las ecuaciones de Green y Amp y de Horton tienen comportamientos diferentes (ver Figura 3.3). En tiempos cortos la ecuación de Green y Amp (1911) es una serie de Taylor en \sqrt{t} mientras que la ecuación de Horton en t , de tal suerte que la

velocidad de infiltración en la primera no está acotada, Ecuación 3.22, contrariamente a lo que ocurre en la segunda, Ecuación 3.26. En tiempos largos (comportamiento asintótico), la ecuación de Horton representa una ordenada al origen constante denominada $[I_o]$, Ecuación 3.33, mientras que en la ecuación de Green y Ampt esta ordenada es una función logarítmica del tiempo $I_o = \lambda \ln(K_s t / \lambda)$. Ambas presentan un régimen permanente en $t \rightarrow \infty$, ecuaciones (24) y (27).

Dado que el régimen permanente es el mismo en ambas ecuaciones ($q_\infty = K_s$), la velocidad de infiltración adimen-

Figura 3.3.
Curvas de
velocidad de
infiltración
de Horton y
de Green y
Ampt



sional cuando $t \rightarrow \infty$, es igual a la unidad ($q_{\infty}^* = 1$).

En este sentido, sólo permanecen como incógnitas los parámetros adimensionales q_{∞}^* y k^* , los cuales pueden ser estimados con algún criterio para minimizar las diferencias entre las curvas de las ecuaciones de Green y Ampt y de Horton para un mismo tipo de suelo.

Se determinó emplear las curvas de lámina infiltrada para efectuar la minimización entre las diferentes ecuaciones puesto que el comportamiento de la velocidad de infiltración la ecuación de Green y Ampt (1911) para $t=0$ está indeterminada, caso contrario ocurre para la ecuación de la lámina infiltrada la cual está determinada para ese mismo instante.

Empleando el criterio de mínimos cuadrados, los parámetros q_{∞}^* y k^* , pueden ser estimados mediante la minimización de la siguiente función objetivo:

Ecuación 3.39

$$ICE^*(q_{\infty}^*, K^*) = \int_{t_o^*}^{t_{\infty}^*} [I_{GA}^*(t^*) - I_H^*(t^*; q_{\infty}^*, k^*)]^2 dt^*$$

Donde los subíndices GA y H indican respectivamente las láminas

infiltradas según las ecuaciones de Green y Ampt y de Horton; t_o^* y t_{∞}^* son los extremos del intervalo de tiempo en donde se realiza la aproximación entre ambas ecuaciones.

El criterio de mínimos cuadrados $\partial ICE^* / \partial q_{\infty}^* = 0$ y $\partial ICE^* / \partial k^* = 0$, conduce al sistema de ecuaciones simultáneas siguiente:

Ecuación 3.40

$$\int_{t_o^*}^{t_{\infty}^*} [I_{GA}^*(t^*) - I_H^*(t^*; q_o^*, k^*)] \frac{\partial I_H^*(t^*; q_o^*, k^*)}{\partial q_o^*} dt^* = 0$$

Ecuación 3.41

$$\int_{t_o^*}^{t_{\infty}^*} [I_{GA}^*(t^*) - I_H^*(t^*; q_o^*, k^*)] \frac{\partial I_H^*(t^*; q_o^*, k^*)}{\partial k^*} dt^* = 0$$

En donde;

Ecuación 3.42

$$\frac{\partial I_H^*(t^*; q_o^*, k^*)}{\partial q_o^*} = \frac{1}{k^*} [1 - \exp(-k^* t^*)]$$

Ecuación 3.43

$$\frac{\partial I_H^*(t^*; q_o^*, k^*)}{\partial q_o^*} = -\frac{q_o^* - q_{\infty}^*}{k^{*2}} [1 - \exp(-k^* t^*)] + \frac{q_o^* - q_{\infty}^*}{k^*} t^* \exp(-k^* t^*)$$

Para aproximar la ecuación de Horton (1940) a la de Green y Ampt (1911) en tiempos cortos se toma $t_o^* = 0$. Para seleccionar el valor de t_{∞}^* se debe considerar que cuando $t^* = 1$, se tiene $t = \tau = \lambda / K_s$ Ecuación 3.17.

Ahora bien, la sorbilidad en el medio de Green y Ampt está definida por $S^2=2K_s\lambda$, es decir $\tau = \frac{1}{2}(S/K_s)^2$.

Por otra parte, se tiene que $\tau = \frac{1}{2}t_{grav}$, ecuación (9). Por lo tanto, cuando $t^*=2$, es decir cuando $t=2\tau=t_{grav}$ se tiene la igualdad entre las fuerzas de absorción y de gravitación. La aproximación de las ecuaciones deberá realizarse para $t_\infty > 2$, es decir para $t_\infty > t_{grav}$.

En este trabajo se selecciona $t_\infty^* = 5$ para asegurar un buen acuerdo entre las ecuaciones alrededor del tiempo gravitacional asegurando también que sus comportamientos asintóticos sean similares en $\Delta_\infty^* = t_\infty^* - t_{grav}^* = 3$.

Para determinar el grado de aproximación se emplea el coeficiente de correlación de Pearson definido tal como se muestra a continuación:

$$r = \sigma_{GA,H}^2 / \sigma_{GA} \sigma_H$$

- $\sigma_{GA,H}^2$ = Covarianza entre las ecuaciones de Green y Ampt y de Horton
- σ_{GA} = Desviación estándar de la ecuación de Green y Ampt
- σ_H = Desviación estándar de la ecuación de Horton

Por su parte, la covarianza está definida por:

Ecuación 3.44

$$\sigma_{GA,H}^2 = \frac{1}{t_\infty^* - t_o^*} \int_{t_o^*}^{t_\infty^*} I_{GA}^*(t^*) I_H^*(t^*) dt^* - \frac{1}{(t_\infty^* - t_o^*)^2} \int_{t_o^*}^{t_\infty^*} I_{GA}^*(t^*) dt^* \int_{t_o^*}^{t_\infty^*} I_H^*(t^*) dt^*$$

las desviaciones estándares son obtenidas de las ecuación (44) con las reglas (Zavala et al., 2007):

$$\sigma_{GA} = \sqrt{\sigma_{GA, GA}^2} \text{ y } \sigma_H = \sqrt{\sigma_{H,H}^2}$$

Una vez definido el intervalo de aproximación, se resuelve numéricamente el sistema de ecuaciones definidos por la Ecuación 3.40 y Ecuación 3.41 para obtener las incógnitas de la ecuación adimensional de Horton, cuyos resultados se muestran a continuación:

$$q_o^* \cong 2.63$$

$$k^* \cong 0.82$$

El coeficiente de correlación obtenido es:

$$r \cong 0.9986$$

La Figura 3.4 muestra el nivel de bondad de la aproximación entre la ecuación de Green y Ampt y de Horton, considerando para esta última $q_\infty^* = 1$, así como los valores de $q_o^* \cong 2.63$, $k^* \cong 0.82$ y el intervalo de

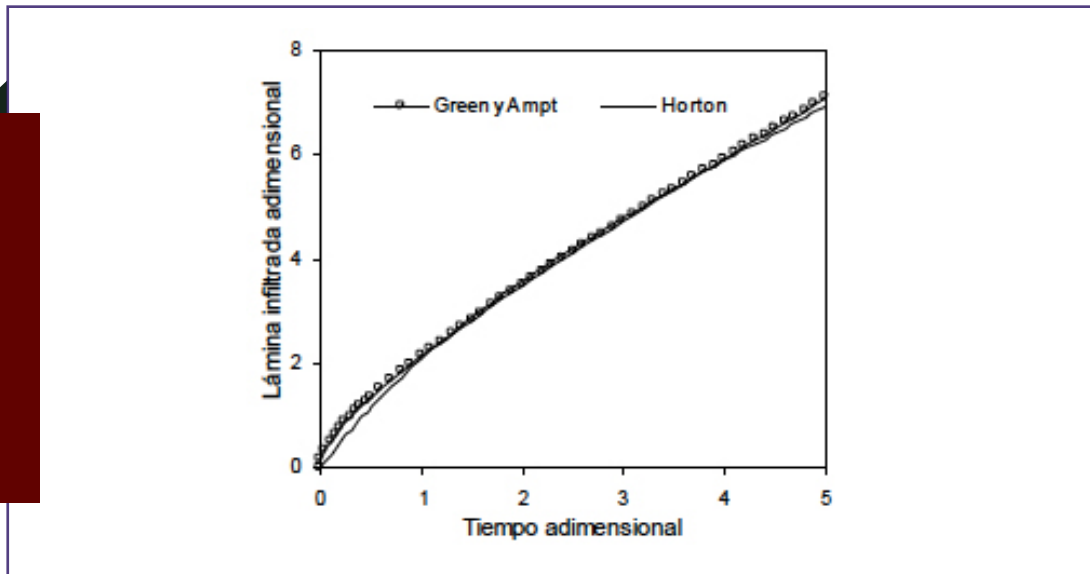


Figura 3.4. Comparación entre las curvas adimensionales de Green y Ampt, ecuación (13) y; de Horton, ecuación (35)

tiempo $0 < t^* < 5$ calculados a partir del procedimiento arriba mostrado.

De esta forma, es posible conocer para cualquier tipo de suelo los parámetros de la ecuación de Green y Ampt, mediante el despeje de las ecuaciones adimensionales Ecuación 3.36, Ecuación 3.37 y Ecuación 3.38.

Así, los parámetros de la ecuación de Horton pueden ser estimados a partir de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt, mediante las relaciones que resultan de la Ecuación 3.24, Ecuación 3.27 y Ecuación 3.38.

$$q_o = q_o^* K_s \quad \text{Ecuación 3.45}$$

$$q_\infty = K_s \quad \text{Ecuación 3.46}$$

Ecuación 3.47

$$k = k^* \frac{K_s}{\lambda} \text{ o } k = k^* \frac{2K_s^2}{S^2}$$

Sustituyendo la ecuación Ecuación 3.45, Ecuación 3.46 y Ecuación 3.47 en la Ecuación 3.25, se obtiene la ecuación de la lámina infiltrada de la ecuación de Horton en función de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt:

Ecuación 3.48

$$I(t) = K_s t + i_o \frac{S^2}{2K_s} \left[1 - \exp\left(-k^* \frac{2K_s^2}{S^2} t\right) \right]$$

Ecuación 3.49

$$i_o = \frac{q_o^* - 1}{k^*} \cong 1.98, \quad k^* \cong 0.82$$

Cabe señalar que la Ecuación 3.48 con $i_o^* = 1$ y k^* corresponde al comportamiento asintótico de la ecuación de Talsma y Parlange (1972) dado por la Ecuación 3.50 y la Ecuación 3.51.

Ecuación 3.50

$$I(t) = K_s t + \frac{S^2}{2K_s} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{2K_s}{S^2} I(t) \right] \right\}$$

Ecuación 3.51

$$q(t) = \frac{K_s}{1 - \exp \left[-\frac{2K_s}{S^2} I(t) \right]}$$

3.3. Aplicaciones

Para ilustrar la relación entre las ecuaciones de Green y Ampt y de Horton, se han seleccionado valores de los parámetros de la primera que

corresponden a tres clases texturales de suelos. El valor del contenido de humedad a saturación es igual a la porosidad volumétrica total del suelo. Los valores de estos parámetros se concentraban en la Tabla 3.1.

Los valores de los parámetros dependientes del contenido de humedad inicial se presenta en la Tabla 3.2. El contenido de humedad inicial es tomado como el correspondiente a una presión del agua en el suelo de $-\frac{1}{3}$ bar, generalmente tomada como la presión de referencia a capacidad de campo.

Para estudiar la bondad de las aproximaciones, se calcula el error cuadrático medio (Ecuación 3.52) entre los puntos que definen las curvas de

Tabla 3.1. Valores de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt para tres suelos de textura contrastante

Suelo	θ_s [cm ³ /cm ³]	K_s [cm/h]	h_f [cm]
Arenoso	0.437	21.00	4.95
Franco	0.463	1.32	8.89
Arcilloso	0.475	0.06	31.63

Tabla 3.2. Valores de los parámetros de la ecuación de Green y Ampt para tres suelos de textura contrastante

Suelo	θ_s [cm ³ /cm ³]	λ [cm]	s (cm/ \sqrt{h})	t_{grav} (h)
Arenoso	0.091	1.71	8.48	0.16
Franco	0.270	1.71	2.13	2.60
Arcilloso	0.396	2.50	0.55	83.29

lámina infiltrada de los modelos de Horton y de Green y Ampt. De manera análoga se procede para el cálculo del error cuadrático medio en la velocidad de infiltración (ver Tabla 3.4).

Ecuación 3.52

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{Np} (I_{GA}(t_i) - I_H(t_i))^2}{Np - 1}}$$

3.4. Resultados

En la Tabla 3.3 se presentan los valores de los parámetros de la ecuación de Horton correspondientes a las relaciones establecidas en las ecuaciones Ecuación 3.45, Ecuación 3.46 y Ecuación 3.47

En la Figura 3.5, Figura 3.6 y Figura 3.7, se presentan las curvas de

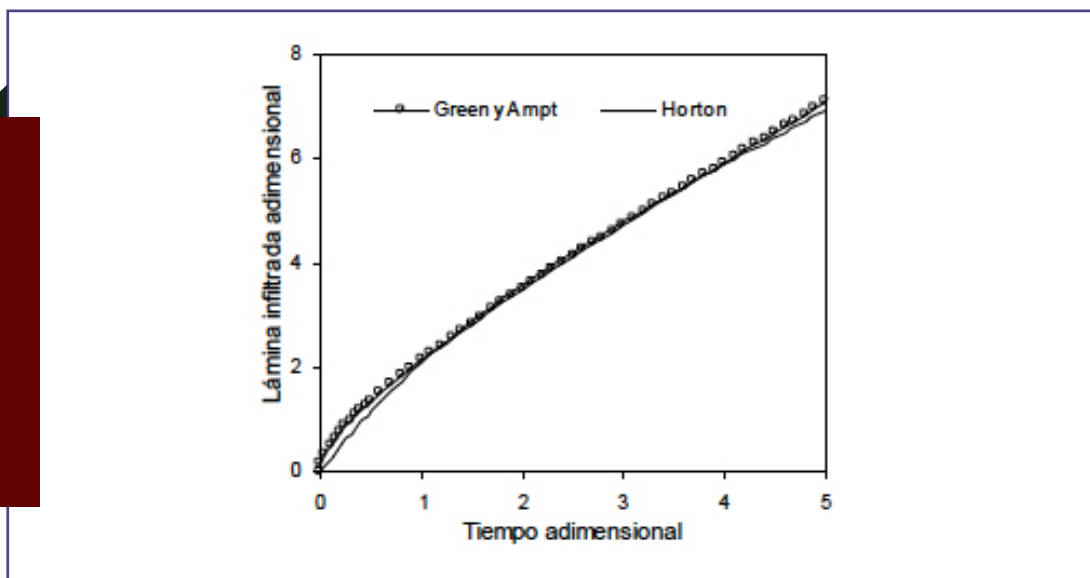


Figura 3.5. Curvas de lámina infiltrada para el caso de un suelo arenoso

Tabla 3.3. Valores de los parámetros de la ecuación de Horton correspondientes de los tres suelos de textura constante de la tabla 1, y al contenido en la Ecuación 3.45, Ecuación 3.46 y Ecuación 3.47.

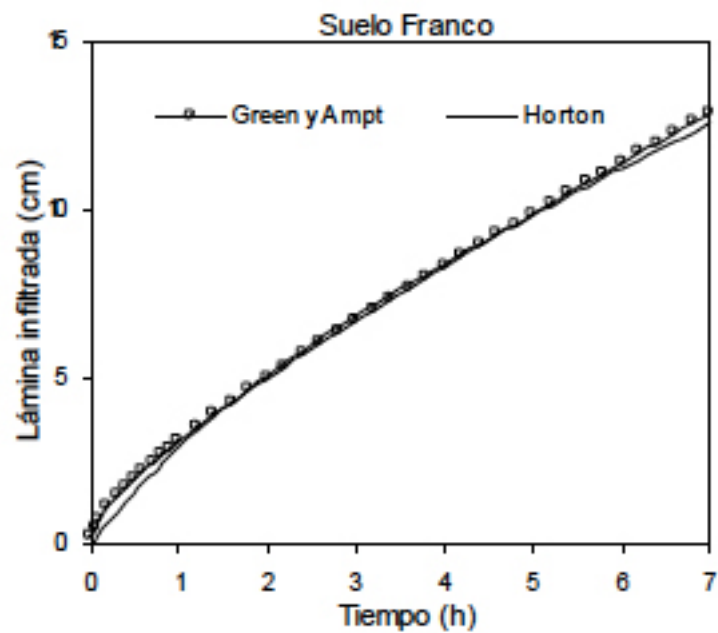
Suelo	q_0 (cm/h)	q_∞ (cm/h)	k (l/h)
Arenoso	55.25	21.00	10.10
Franco	3.47	1.32	0.63
Arcilloso	0.16	0.06	0.02

lámina infiltrada correspondientes al modelo de Green y Ampt y de Horton para tres tipos de suelos con texturas constantes. En la Figura 3.8, Figura 3.9 y Figura 3.10 se presentan las curvas de velocidad de infiltración para los mismos tipos de suelos.

Con los resultados obtenidos se demuestra que existe un intervalo

de tiempo, entre el inicio del proceso de infiltración y el tiempo gravitacional, en donde el comportamiento de la lámina infiltrada del modelo de Horton rdtá por debajo de la curva de la lámina de infiltración calculada a través del modelo de Green y Ampt.

Figura 3.6.
Curvas
de lámina
infiltrada
para el caso
de un suelo
franco



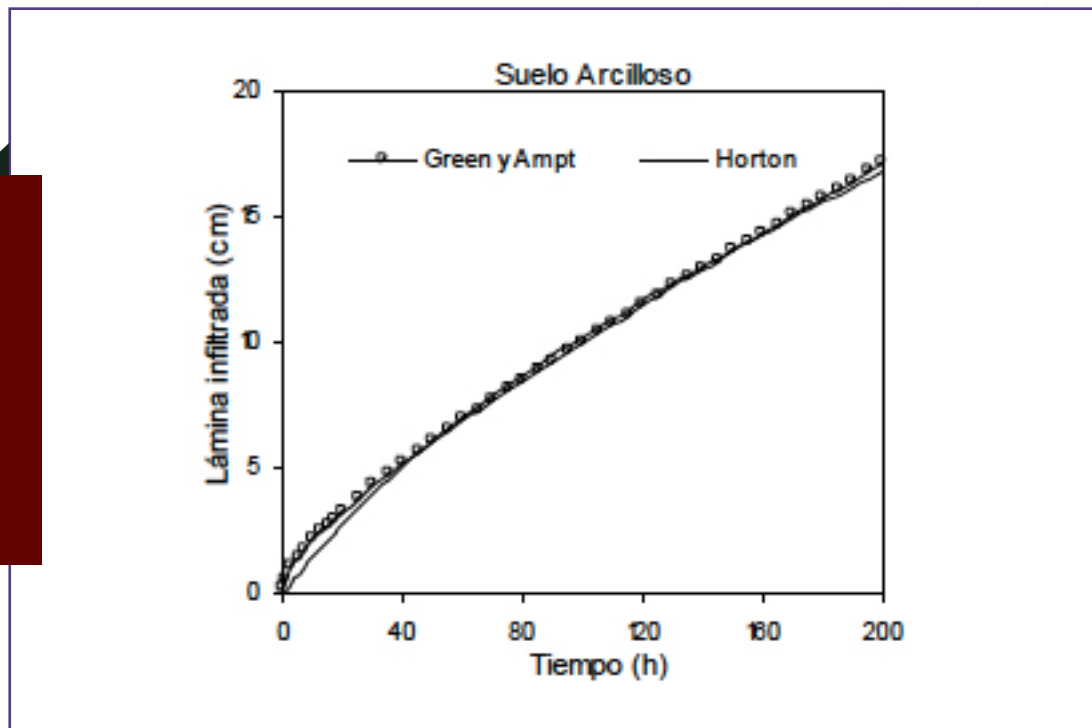


Figura 3.7. Curvas de lámina infiltrada para el caso de un suelo arcilloso

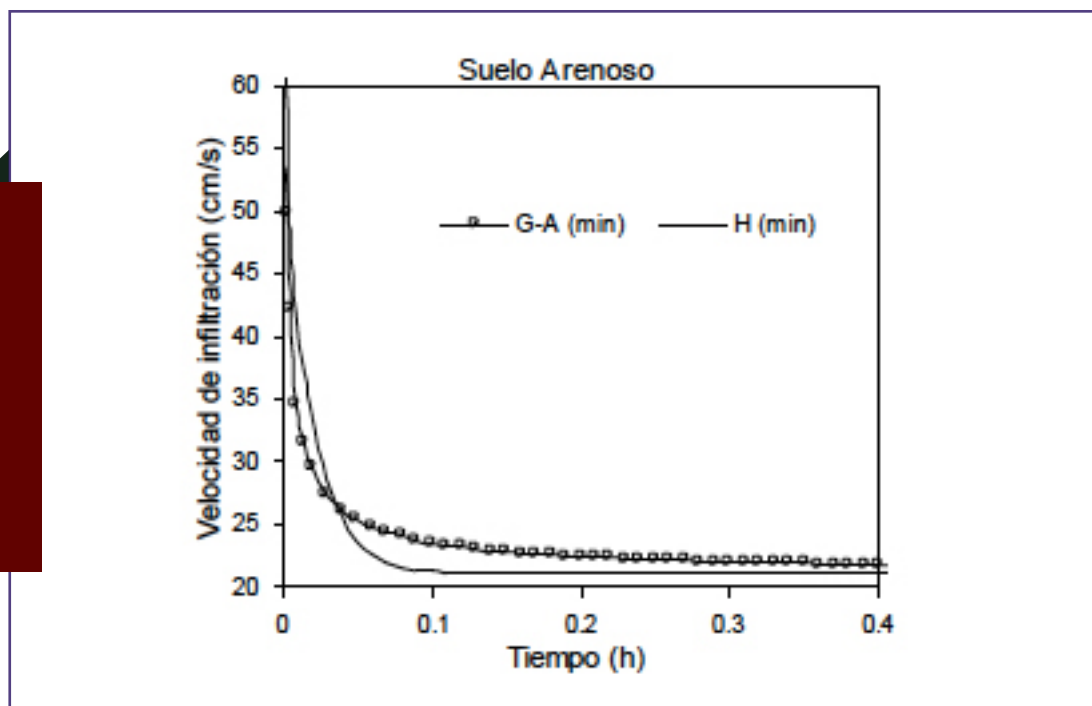


Figura 3.8. Curvas de velocidad de infiltración para el caso de un suelo arenoso

Figura 3.9.
Curvas de
velocidad de
infiltración
para el caso
de un suelo
franco

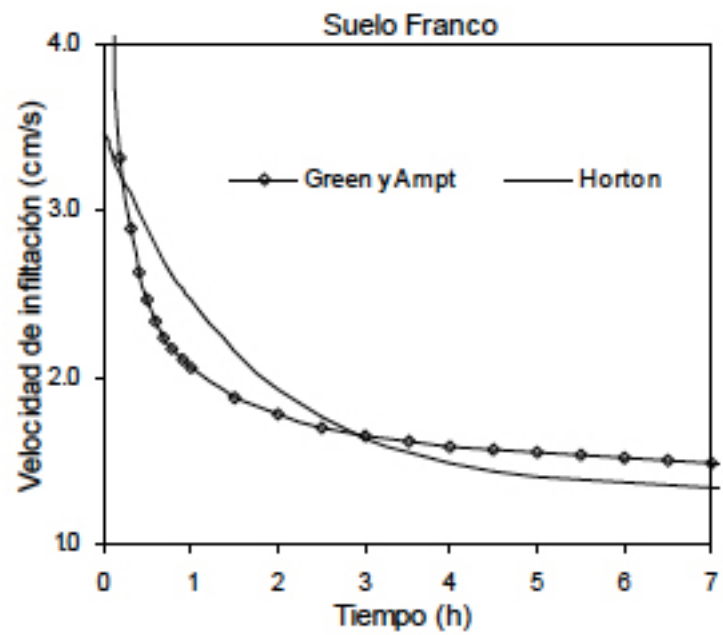
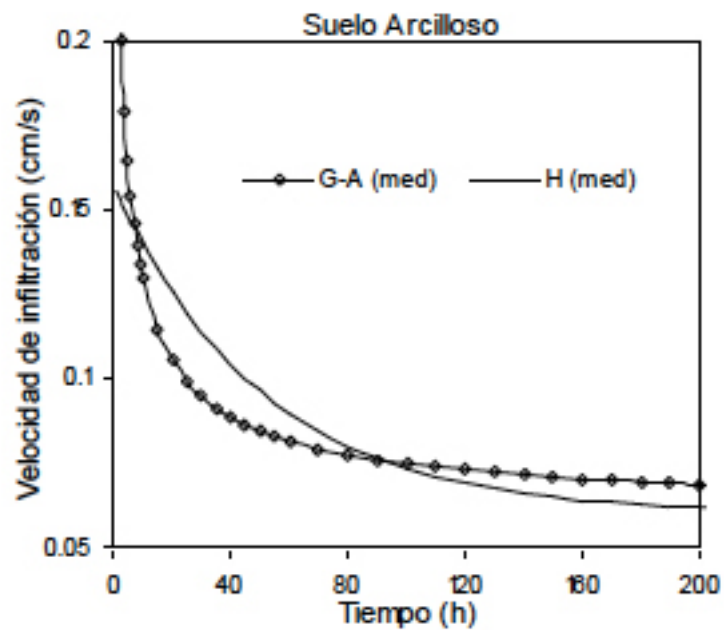


Figura 3.10.
Curvas de
velocidad de
infiltración
para el caso
de un suelo
arcilloso



Para el caso del suelo arenoso dicha desviación se presenta entre $t=0$ h y $t=0.16$ h; para el caso de un suelo franco entre $t=0$ h y $t=2.60$ h; finalmente, para el caso de un suelo arcilloso entre $t=0$ h y $t=83.29$ h (ver Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7 y Tabla 3.2. La diferencia de comportamiento de la lámina infiltrada se explica porque el modelo de Green y Ampt varía a razón de la raíz cuadrada del instante en donde se estima. Este resultado era de esperarse en virtud del análisis inspeccional mostrado anteriormente. En la Tabla 3.4 se presentan los valores del Error Cuadrático Medio.

Los resultados permiten observar la bondad de la correlación entre la lámina infiltrada calculada a través de los modelos de Green y Ampt de

Horton para los tres tipos de suelo considerados.

3.5. Conclusiones

Se ha propuesto una relación entre los parámetros de la ecuación de infiltración de Horton y los del modelos de Green y Ampt. Los comportamientos de las ecuaciones en tiempos extremos, sobre todo en tiempos cortos, son diferentes. Para obtener la relación, las ecuaciones han sido escritas adimensionalmente, utilizando las escalas naturales de la ecuación de Green y Ampt. La bondad de la relación propuesta entre los parámetros de las ecuaciones de Green y Ampt y de Horton es ilustrada en tres suelos de textura contrastante (arenosa, franca, arcillosa)

Tabla 3.4. Error cuadrático medio entre las curvas de Horton y de Green y Ampt

Suelo	ECM (I)	ECM (q)
Arenoso	0.182	4.378
Franco	0.182	0.429
Arcilloso	0.266	0.020

3.6. Referencias

- Darcy, H., (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.
- Green, W.H., y G.A. Ampt, (1911). "Studies in soil physic, I: the flow of air and water through soils". J. Agric. Sci., 4: 1-24.
- Fuentes, C., J.-Y. Parlange, R. Haverkamp y M. Vauclin, (2001). "La solución cuasi-lineal de la infiltración vertical". Ingeniería Hidráulica en México, 16(4): 25-33.
- Haverkamp, R., J.-Y. Parlange, J.L. Starr, G. Schmitz, y C. Fuentes, (1990). "Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters". Soil Sci., 149: 292-300.
- Horton, R.E., (1940). "An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 5: 399-417.
- Kostiakov, A.N., (1932). "On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration". Trans. Sixth Comm. Intl. Soc. Soil Sci., Part A: 17-21.
- Parlange, J.-Y., R.D. Braddock, I. Lisle, y R.E. Smith, (1982). "Three parameter infiltration equation". Soil Sci., 111: 170-174.
- Parlange, J.-Y., R. Haverkamp, y J. Touma, (1985). "Infiltration under ponded conditions: 1. Optimal analytical solution and comparison with experimental observations". Soil Sci. 139: 305-311.
- Philip, J.R., (1957). "The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solutions". Soil Sci., 83: 345-357.
- Philip, J.R., (1969). "Theory of infiltration". Adv. Hydrosc., 5: 215-305. Academic Press, New York.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, y K.E. Saxton, (1982). "Estimation of Soil Water Properties". Transactions of the ASAE, 25(5): 1316-1320.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, y N. Miller, (1983). "Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data". Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 109(1): 62-70.
- Smith, R.E., y J.-Y. Parlange, (1978). "A parameter efficient hydrologic infiltration model". Water Resources Res., 14: 533-538.
- Talsma, T., y J.-Y. Parlange, (1972). "One-dimensional vertical infil-

tration". Aust. J. Soil. Res., 10:
143-150.

Zavala, M., C. Fuentes, y H. Saucedo,
(2007). "Non-linear radiation
in the Boussinesq equation of
the agricultural drainage". J. of
Hydrology, 332: 374-380.



AMH

Asociación Mexicana
de Hidráulica

REVISTA DIGITAL
TLÁLOC AMH

<http://amh.org.mx/>