

MAPA NACIONAL DE ÍNDICE DE INUNDACIÓN

• Edgar Misael Uribe-Alcántara • María Alejandrina Leticia Montes-León •
• Efraín García-Celis •
Agroasemex, S.A.

Resumen

Las inundaciones están asociadas con diversos factores como: 1) desbordamiento de ríos; 2) inundaciones súbitas, 3) mareas altas asociadas con huracanes, y 4) rompimiento de estructuras de control. Desafortunadamente, los registros históricos de inundación son prácticamente inexistentes. Por lo tanto, los análisis de riesgos generalmente se basan en métodos indirectos, como la modelación físico-matemática. Se presenta el desarrollo de un Mapa Nacional de un Índice de Inundación que permita identificar zonas propensas a inundación. El índice propuesto está basado en el Índice Topográfico desarrollado por Beven y Kirkby (1979), pero adicionalmente considera factores edafológicos, hidrológicos y climatológicos. El proceso se detalla para la Región Hidrológica Lerma-Santiago. Adicionalmente, los resultados son comparados con la simulación correspondiente de un modelo de tránsito de avenidas detallado de la planicie de inundación de Tabasco, México. Los resultados indican que el índice captura razonablemente bien las zonas perennes y efímeramente inundadas. Se incluye el Mapa Nacional Mexicano del Índice de Inundación obtenido con base en la metodología propuesta.

Palabras clave: inundación, índice, riesgo, México, Grijalva-Usumacinta, Lerma-Santiago.

Introducción

Las inundaciones están asociadas con diversos factores como: 1) desbordamiento de ríos; 2) mareas altas asociadas con huracanes, y 3) rompimiento de estructuras de control. Desafortunadamente, los registros históricos de inundación son prácticamente inexistentes. Por lo tanto, los análisis de riesgo generalmente se basan en métodos indirectos, como la modelación físico-matemática. En dicho contexto, la aplicación de modelos generalmente tiene como objetivo documentar la magnitud y probabilidad de daños por inundación, a partir de simulaciones basadas en registros históricos de lluvia y caudal. Se propone entonces el desarrollo de un Mapa Nacional de un Índice de Inundación que permita identificar las zonas propensas a inundación con base en análisis simplificados y acordes con la información disponible en el ámbito nacional.

El índice propuesto se basa en el Índice Topográfico propuesto por Beven y Kirkby (1979). El Índice Topográfico es definido como el cociente entre acumulación de flujo (área de drenaje parcial "aguas arriba" para un punto en particular) y la tangente de la pendiente. Su aplicación principal consiste en la identificación de humedales (*wetlands*), definidos como zonas perennes o efímeramente saturadas o inundadas. Debido a que la distribución probabilística del Índice Topográfico es bimodal para una cuenca, y los valores altos del índice corresponden a regiones propensas a inundación, el índice constituye un elemento poderoso y simple para la determinación de dichas regiones (Kirkby *et al.*, 1995; Rohde y Seibert, 1999; Merot *et al.*, 1993; entre otros). La literatura documenta variaciones del Índice Topográfico. Las diferencias radican en la implementación de información adicional, co-

mo tipo y uso de suelo, precipitación, humedad de suelo, evapotranspiración, etcétera.

A pesar de que el término “Acumulación de Flujo” sugiere que se consideran los volúmenes de agua involucrados, esto no sucede en realidad, pues se trata de una variable derivada a partir únicamente de la topografía. Debido a que las características climatológicas y de tipo y uso de suelo del país son diversas, aunque dos cuencas tuvieran características topográficas similares, su riesgo de inundación podría ser muy distinto. De esa manera, el Índice Topográfico resulta insuficiente para caracterizar el riesgo de inundación en el país. Por lo cual, se propone un índice modificado que permita capturar dichas diferencias.

Datos

Para la estimación del índice de inundación se empleó la siguiente información:

- Topografía (continuo de elevación digital (CEM) de INEGI con pixel de aproximadamente 30 m).
- Mapas de vegetación y uso de suelo (INEGI, 2004, 1:250,000).
- Mapa de edafología (INEGI, 2006, 1:250,000).

Adicionalmente, para solventar la falta de homogeneidad en cobertura espacial y temporal de la base de datos climatológica nacional, Agroasemex, S.A., ha desarrollado Arreglos Regulares (mallas) de precipitación y otras variables climatológicas a partir del método de Cressman (1959). Las mallas ofrecen una base de datos climatológica completa espacial y temporalmente en todo el país para el periodo 1979-2008. El método de Cressman consiste en la corrección de un campo preliminar (estimación indirecta de la variable de interés) a partir de observaciones. El campo preliminar está constituido por los datos del North American Regional Reanalysis (NARR) (Mesinger *et al.*, 2006) elaborado por el National Center for Environmental Prediction del National

Oceanic and Atmospheric Administration. Las observaciones de precipitación son tomadas de CLICOM (Clima Computarizado) y GASIR (Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Las mallas cuentan con una resolución temporal diaria y pixeles de 0.2° (~22 km).

Metodología

Se propone un índice definido como el cociente entre acumulación de escurrimiento y la tangente de la pendiente. El escurrimiento es estimado a partir del tipo y uso de suelo, y la precipitación observada según el método de número de curva. De manera que es posible estimar la cantidad total de agua que escurra por un punto dado, así como su probabilidad de ocurrencia. El análisis se realiza por cada una de las cuencas, por lo cual, el primer paso consiste en la extracción del CEM de la región hidrológica de interés. Los sumideros son rellenados y los picos son removidos para deponer imperfecciones en los datos. Posteriormente se estima la dirección de flujo de cada celda a la de su vecina más cercana. Además, se calcula la pendiente y su tangente. Por otra parte, el escurrimiento se calcula mediante el método de curva numérica. Debido a que las clasificaciones de tipo de suelo de INEGI no son compatibles con las tablas de correspondencia de número de curva tradicionales, desarrolladas en Estados Unidos de Norteamérica, se hizo una reclasificación que permitiera la aplicación de las tablas de correspondencia. Los valores del número de curva bajo condiciones normales de humedad de suelo fueron pasados a una retícula para cubrir una a una las celdas del CEM.

Una vez estimado el número de curva correspondiente para cada pixel del CEM, se procedió a estimar el escurrimiento de acuerdo con el método de curva numérica:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Donde:

P = precipitación acumulada (mm).
 S = parámetro de retención máxima de humedad del suelo (mm), que depende del número de curva (CN), según la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Debido a que se trata de estimar zonas propensas a inundación por causa de eventos extremos de precipitación, los valores de precipitación empleados para cada región corresponden al percentil 95 de cada celda del arreglo regular de precipitación de Agroasemex, S.A.

A continuación se estima la acumulación de escurrimiento. La diferencia entre acumulación de flujo y acumulación de escurrimiento radica en que la primera consiste en contar el número de celdas que contribuyen a cada celda, mientras que en la segunda se cuentan los milímetros de escurrimiento asociados con cada celda.

Por último se estima el índice de inundación con base en la siguiente expresión:

$$II = \ln \left[\frac{Ac Q}{\tan s} \right]$$

Donde:

II = índice de inundación.
 $Ac Q$ = acumulación de escurrimiento.
 S = pendiente.

Resultados

La metodología requiere ser aplicada para cuencas completas. Por ello, y por razones de simplicidad, eficiencia y presentación, el índice de inundación se ha estimado individualmente para cada una de las 37 regiones hidrológicas que conforman el territorio mexicano (ver figura 1 y cuadro 1).

A continuación se analiza la metodología y sus resultados en la Región Hidrológica Número 12, denominada "Lerma-Santiago".

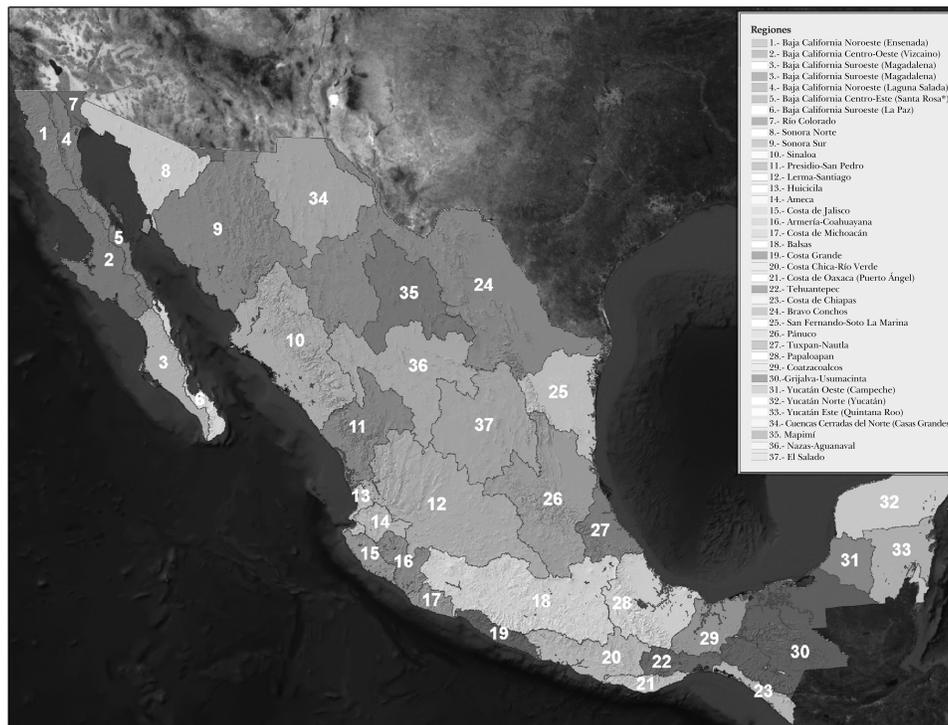


Figura 1. Mapa de las 37 regiones hidrológicas de la república mexicana.

Cuadro 1. Regiones hidrológicas de la república mexicana.

Núm.	Nombre de la región	Núm.	Nombre de la región
1	Baja California Noroeste (Ensenada)	20	Costa Chica y Río Verde
2	Baja California Centro-Oeste (El Vizcaíno)	21	Costa de Oaxaca (Puerto Ángel)
3	Baja California Sur-Oeste (Magdalena)	22	Río Tehuantepec
4	Baja California Noroeste (Laguna Salada)	23	Costa de Chiapas
5	Baja California Centro-Este (Sta. Rosalía)	24	Río Bravo-Río Conchos
6	Baja California Sur-Este (La Paz)	25	Ríos San Fernando y Soto La Marina
7	Río Colorado	26	Río Pánuco
8	Sonora Norte	27	Ríos Tuxpan y Nautla
9	Sonora Sur	28	Río Papaloapan
10	Sinaloa	29	Río Coatzacoalcos
11	Ríos Presidio y San Pedro	30	Ríos Grijalva-Usumacinta
12	Ríos Lerma y Santiago	31	Yucatán Oeste (Campeche)
13	Río Huicicila	32	Yucatán Norte (Yucatán)
14	Río Ameca	33	Yucatán Este (Quintana Roo)
15	Costa de Jalisco	34	Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes)
16	Ríos Amería y Coahuayana	35	Mapimí
17	Costa de Michoacán	36	Ríos Nazas y Aguanaval
18	Río Balsas	37	El Salado
19	Costa Grande		

Como la metodología es la misma para el resto de las regiones, se considera innecesario realizar el mismo análisis para todas ellas. La RH12 se encuentra conformada principalmente por los estados de Jalisco, Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y, en una menor porción, por Durango, Michoacán, Querétaro y el Estado de México. Dentro de los cauces más importantes se pueden nombrar el río Lerma, el río Grande Santiago y el río Verde. El almacenamiento o vaso regulador más importante con que cuenta la zona es la laguna de Chapala. Esta región tiene una superficie aproximada de 133 455 km².

La figura 2 muestra el CEM de la Región Hidrológica Número 12 con cotas que se encuentran entre 0 y 4 660 msnm.

El resultado de la determinación del escurrimiento puede observarse en la figura 3; Su rango de variación se encuentra entre 0 y 130 mm. Es posible notar que existen dos tipos de variaciones espaciales, resultado de arreglos regulares de diferentes resoluciones: 1) Precipitación anual con una

resolución espacial de aproximadamente 20 km, y 2) Campo de *número de curva* con una resolución espacial de aproximadamente 30 metros.

El mapa correspondiente a la tangente de la pendiente, es decir, el denominador del índice de inundación, se muestra en la figura 4. Las zonas más oscuras indican pendientes pequeñas, asociadas con sitios susceptibles de ser inundables por su poca capacidad de escurrimiento por gravedad. Las zonas con pendientes grandes son susceptibles a generar mayor cantidad de escurrimiento y, por lo tanto, son relativamente más propensas a erosión hídrica.

Una vez que se obtienen los parámetros necesarios para determinar el índice de inundación, se estima el índice de inundación de acuerdo con la expresión indicada en la metodología. El índice de inundación resultante es mostrado en la figura 5. Las zonas rojas indican una alta susceptibilidad a inundación, mientras que las gris claro indican lo opuesto. El índice es continuo, y varía

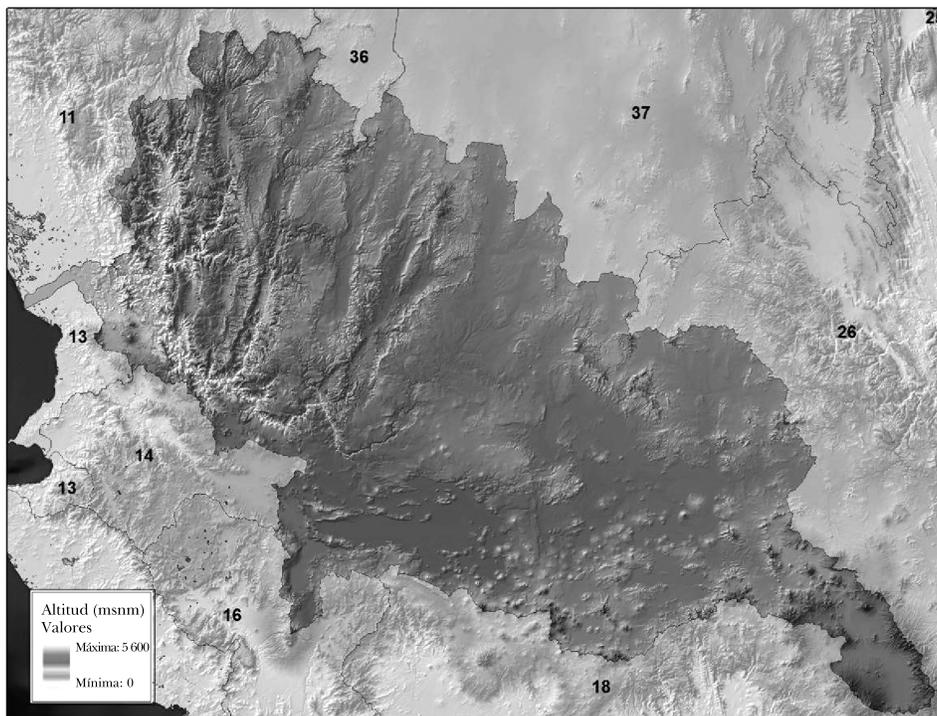


Figura 2. MDE de la Región Hidrológica Número 12 (RH12).

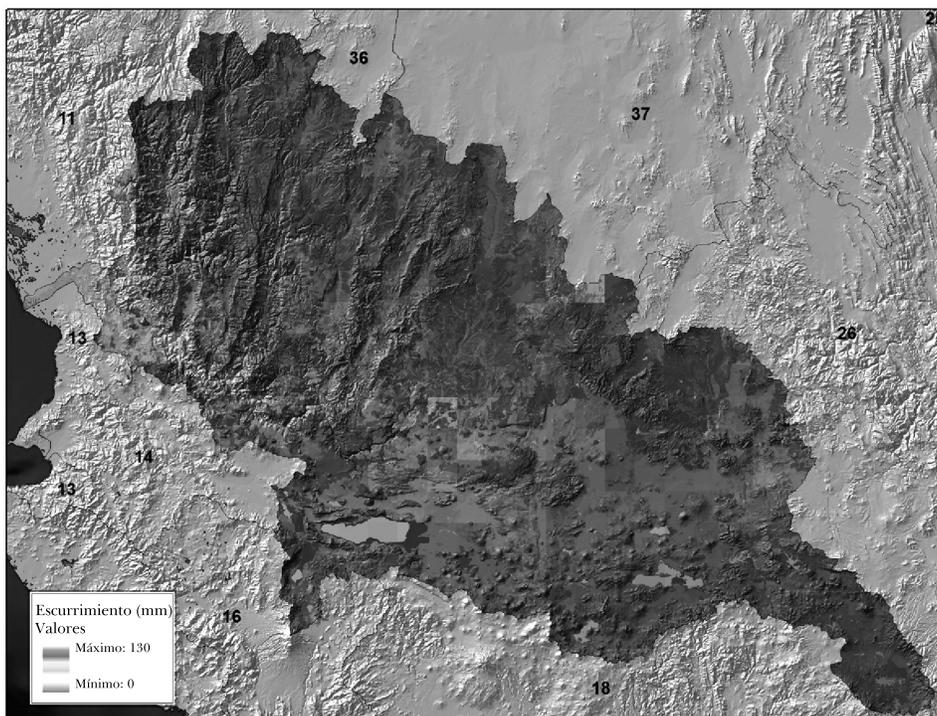


Figura 3. Ecurrimento de la RH12.

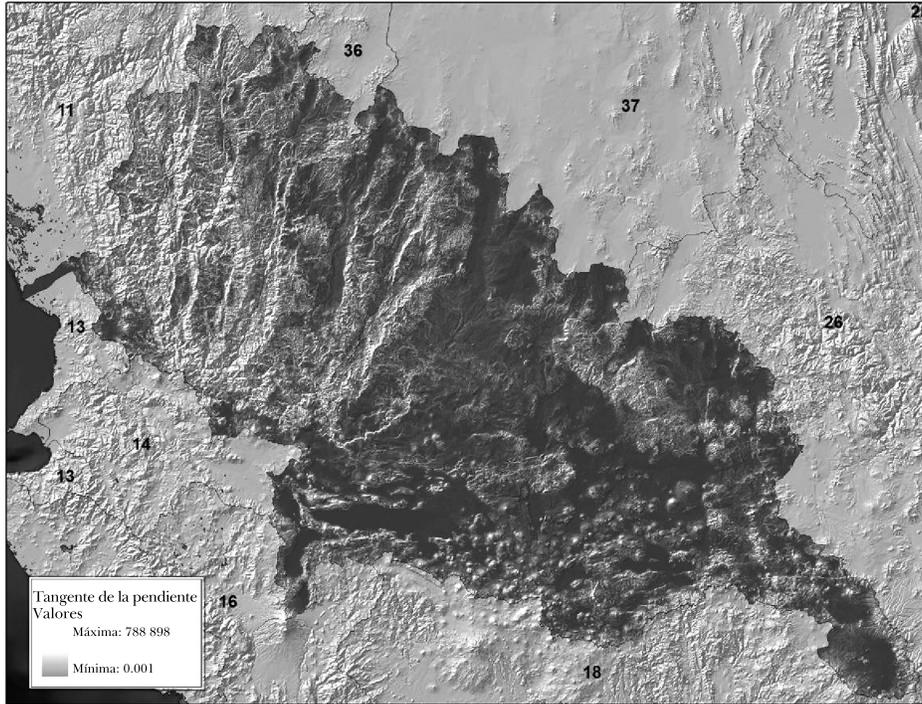


Figura 4. Mapa de la tangente de la pendiente de la RH12.

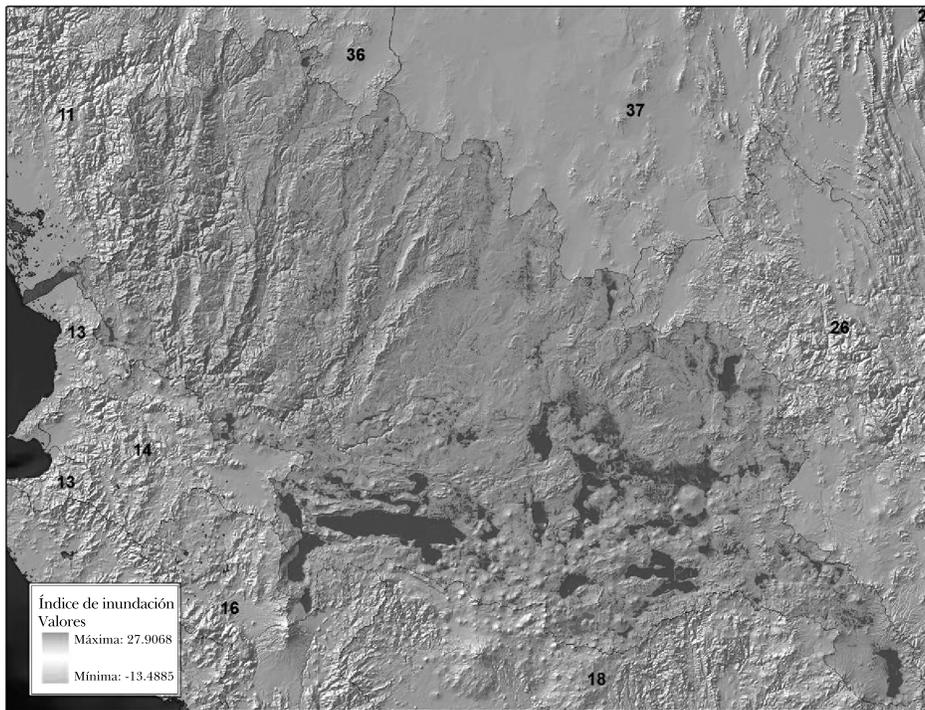


Figura 5. Mapa de índice de inundación de la RH12.

entre aproximadamente -14 y 28. Aunque los valores del índice pueden ser empleados para determinar el riesgo de inundación relativo entre diferentes regiones hidrológicas, el análisis puede ser simplificado para una misma cuenca mediante una clasificación binaria del índice de inundación. La clasificación se basa en el hecho de que el índice de inundación tienen una distribución probabilística bimodal (figura 6). Siguiendo la convención encontrada en la literatura, la porción superior del histograma corresponde a regiones susceptibles de ser inundadas, mientras que la porción inferior corresponde a zonas libres de esta amenaza.

La figura 7 muestra el resultado de la clasificación binaria, indicando en gris oscuro las zonas identificadas con riesgo de inundación. En este mapa es posible observar que las zonas propensas a inundación coinciden con regiones de baja pendiente, e incluso es posible capturar cuerpos de agua importantes, como el lago de Chapala y el cauce de algunos ríos. Parecería innecesario identificar el riesgo de

que dichas zonas sufran exceso de humedad, pues su naturaleza perenne lo hace evidente; sin embargo, es importante recordar que la metodología no incluye información alguna de la ubicación de dichos cuerpos de agua. Por lo tanto, estos resultados sugieren que el índice tiene la capacidad de identificar regiones perennemente inundadas, y se espera que su validez se extienda a zonas efímeramente saturadas o cubiertas de agua. La metodología anteriormente descrita es aplicada a todas las regiones hidrológicas.

Por último, con el objetivo de corroborar la validez de los resultados por otros medios, se estimó la erosión hídrica con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (artículo en proceso de publicación, Montes *et al.*, 2009). En la figura 8 se muestran los resultados en la Región Hidrológica Número 12. Las zonas susceptibles de ser inundables coinciden con las zonas que presentan un índice de erosión bajo. Dicho resultado es el esperado, pues en estas zonas se depositan los sedimentos

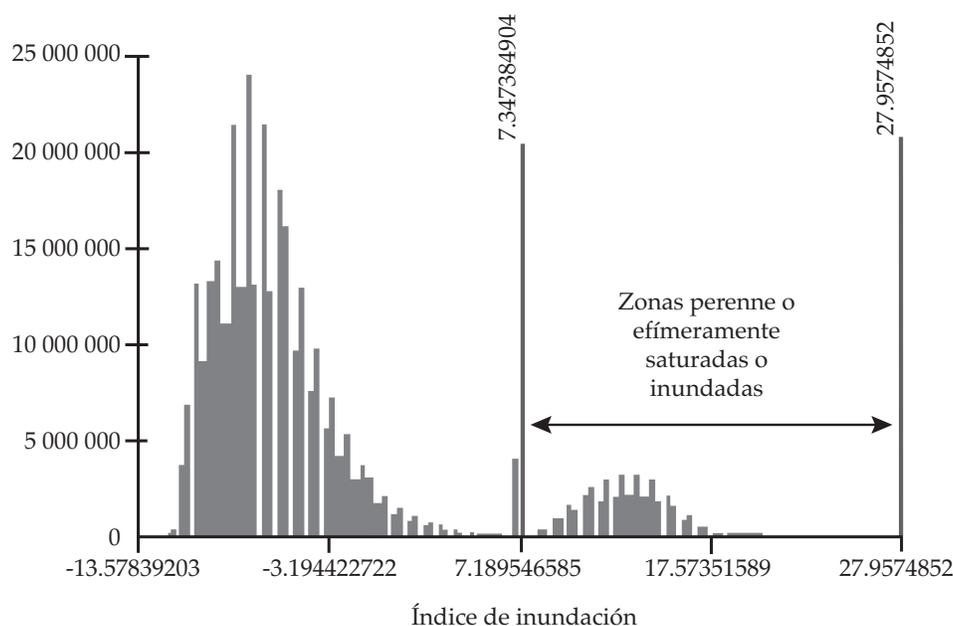


Figura 6. Histograma en donde se puede apreciar que los datos presentan una distribución bimodal.

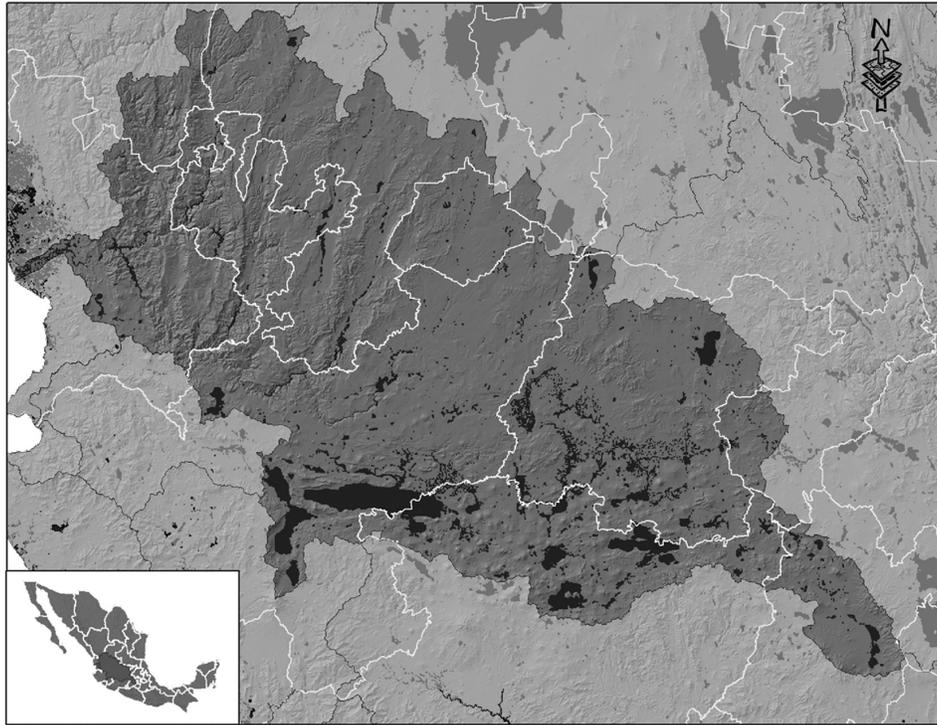


Figura 7. Zonas propensas a inundación por evento extremo de precipitación (gris oscuro) en la Región Hidrológica Número 12.

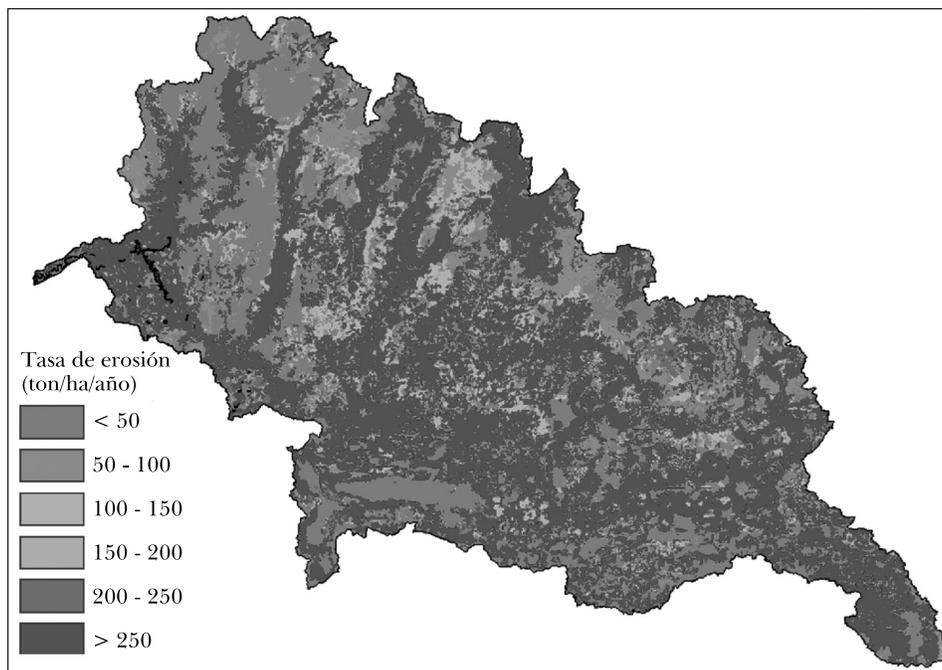


Figura 8. Mapa de erosión hídrica de la RH12.

producidos en las áreas con altos índices de erosión. Cabe mencionar que con el paso del tiempo, la acumulación de sedimentos provoca que los cauces pierdan capacidad hidráulica, y los lagos o lagunas su capacidad de regulación, propiciando que se incremente el índice de inundación.

Validación de resultados

Debido a que se cuenta con un modelo hidrológico e hidráulico para una porción de la planicie de inundación de Tabasco, las simulaciones de dicho modelo fueron comparadas con el índice de inundación en la misma región, con el objetivo de estimar su confiabilidad. La región modelada (figura 9) se encuentra dentro de la Región Hidrológica Número 30, denominada Grijalva-Usumacinta, que comprende varios estados de la república mexicana, como Tabasco, Chiapas y Campeche. La región cuenta con los ríos más caudalosos del país, entre los que se pueden mencionar El Grijalva, Usumacinta, Carrizal, Samaria y Mezcalapa. Además, tiene el complejo hidroeléctrico más grande del país, compuesto por cuatro plantas hidroeléctricas: Chicoasén, Angostura, Malpaso y Peñitas, lo que permite controlar los escurrimientos hacia aguas abajo del cauce del río Mezcalapa.

El modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca fue desarrollado con anterioridad por Agroasemex, S.A., con el propósito de desarrollar un esquema de seguro por inundación agropecuario en Tabasco. Se trata de un modelo detallado en la cuenca de los ríos de La Sierra, que comprende los cauces de los ríos Tapijulapa, Pichucalco, Teapa, Tapaté, La Sierra y Grijalva, cuyas características son, entre otras: seccionamiento transversal sobre el cauce de los ríos (280 secciones transversales); modelos de elevación digital escala 1:5,000 hasta 1:20,000; altura de los bordos longitudinales existentes, y geometría y ubicación de obras hidráulicas. Asimismo, se realizó un estudio hidrológico, donde se analizaron factores de simultaneidad

e hidrogramas asociados con diferentes periodos de retorno, identificación de las zonas susceptibles de ser inundadas y conexiones entre éstas.

Como en la frontera aguas arriba se cuenta con hidrogramas asociados con las estaciones hidrométricas, y aguas abajo una curva $Q-H$ característica de la sección seleccionada, el modelo se calibró en las escalas y estaciones ubicadas en la parte media y baja de la cuenca, de acuerdo con los niveles emitidos por Conagua, y se validó la extensión de la mancha de afectación con imágenes de satélite proporcionadas por el Cenapred, asociadas con el evento ocurrido en 2007. Debido a la cantidad de información y nivel de detalle, es de esperarse que los resultados sean diferentes. Sin embargo, se confía en que la comparación permita estimar la efectividad del índice propuesto para la identificación de zonas propensas a inundación.

La figura 10 muestra la topografía de la zona y la extensión de la afectación asociada con el evento del año 2007 en la zona de los ríos de La Sierra, según el modelo hidrológico-hidráulico de Agroasemex, S.A. Se puede apreciar la importancia del relieve, pues las zonas altas del MDE no son afectadas. Por otra parte, la figura 11 muestra en diferentes tonos de gris las regiones propensas a inundación, según la metodología aquí propuesta (gris oscuro) y el área simulada con el modelo hidrológico hidráulico (gris claro). Ambas regiones coinciden en su mayor parte de manera satisfactoria, especialmente considerando la gran diferencia que existe en la información involucrada y metodologías empleadas. Las diferencias en las fronteras este y oeste se deben a que las fronteras del dominio en el modelo hidráulico son más limitadas.

Mapa Nacional de Índice de Inundación: consideraciones

La figura 12 muestra los resultados de aplicar la metodología descrita a escala nacional.

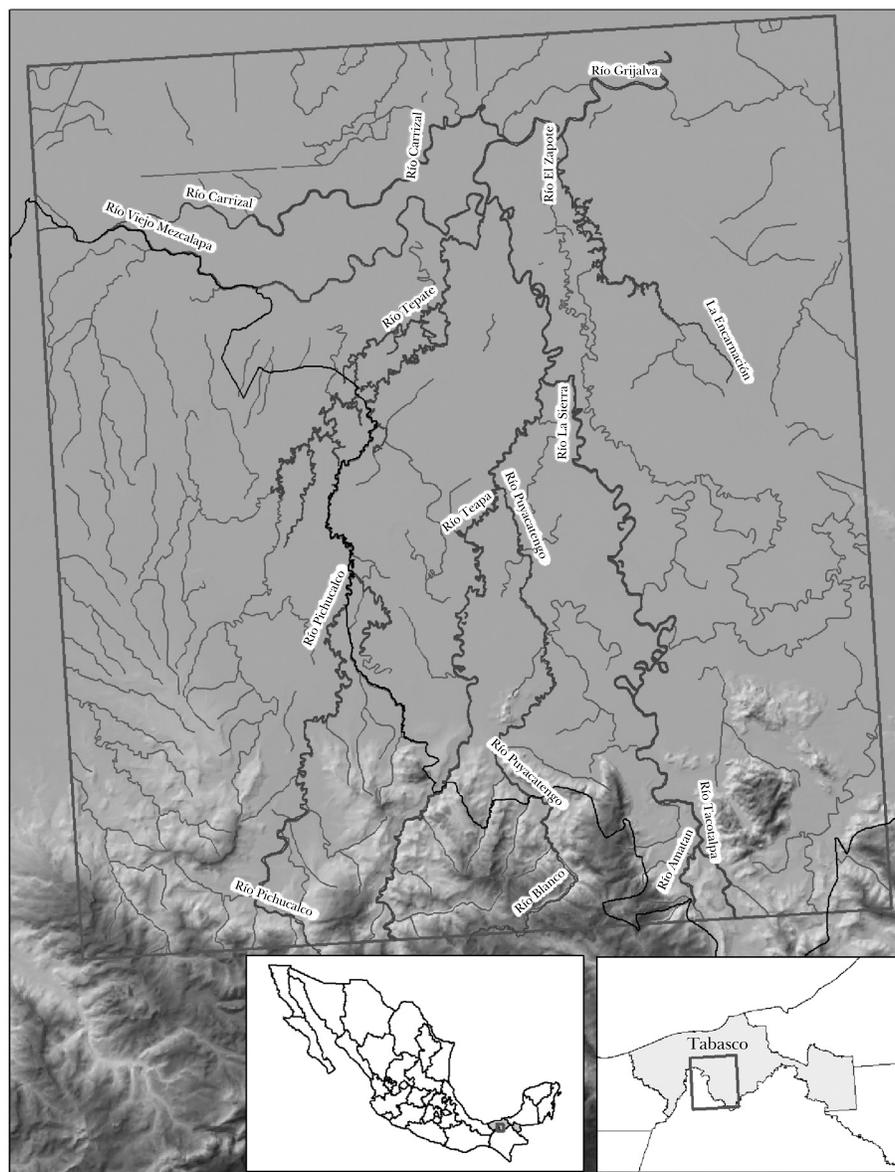


Figura 9. Ubicación del dominio del modelo hidrológico-hidráulico de Agroasemex, S.A., (recuadro en el estado de Tabasco) e hidrografía de la zona.

Debido a que la resolución del CEM de INEGI es de 30 m, el mapa nacional original resulta sobresaturado de información; es decir, aparentemente todo el país está en riesgo de inundación. Por ello, los resultados originales son procesados para obtener un mapa apropiado para su impresión en la actual revista. El procesamiento consiste en estimar el análisis de índice de inundación a

los datos de topografía del SRTM, cuya menor resolución espacial (~90 m) es más apropiada para impresión.

Por su menor resolución, las características que refleja el mapa son cuerpos de agua mayores, como lagos y planicies de inundación. Algunas de las características que son filtradas con el aumento de escala son ríos relativamente delgados. Sin embargo, el hecho de que sea

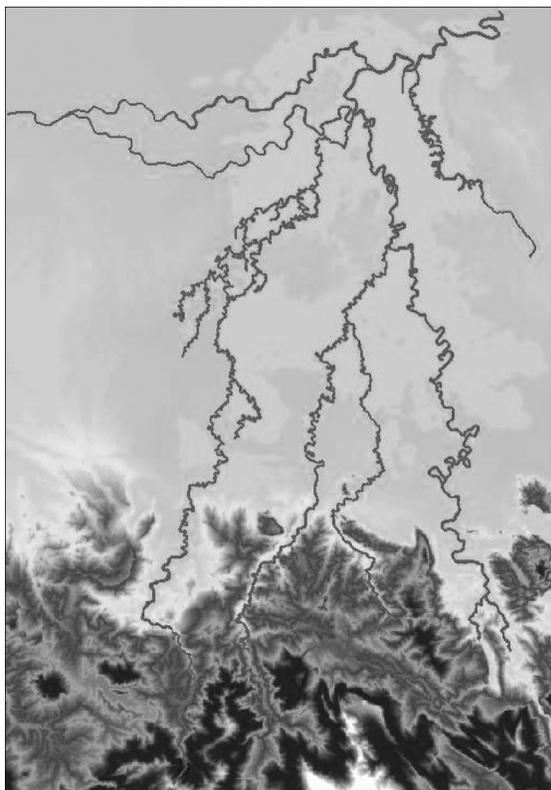


Figura 10. Mancha de inundación asociada con el evento de 2007, según el modelo hidrológico-hidráulico de Agroasemex, S.A. (gris claro) y topografía de la zona.

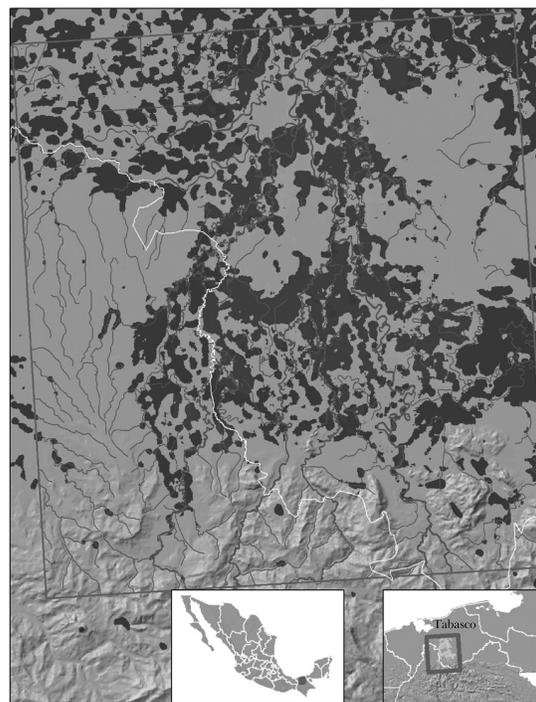


Figura 11. Mapa de zonas propensas a inundación según el índice de inundación (gris oscuro) y mancha de inundación según el modelo hidráulico detallado de los ríos de La Sierra (gris claro).

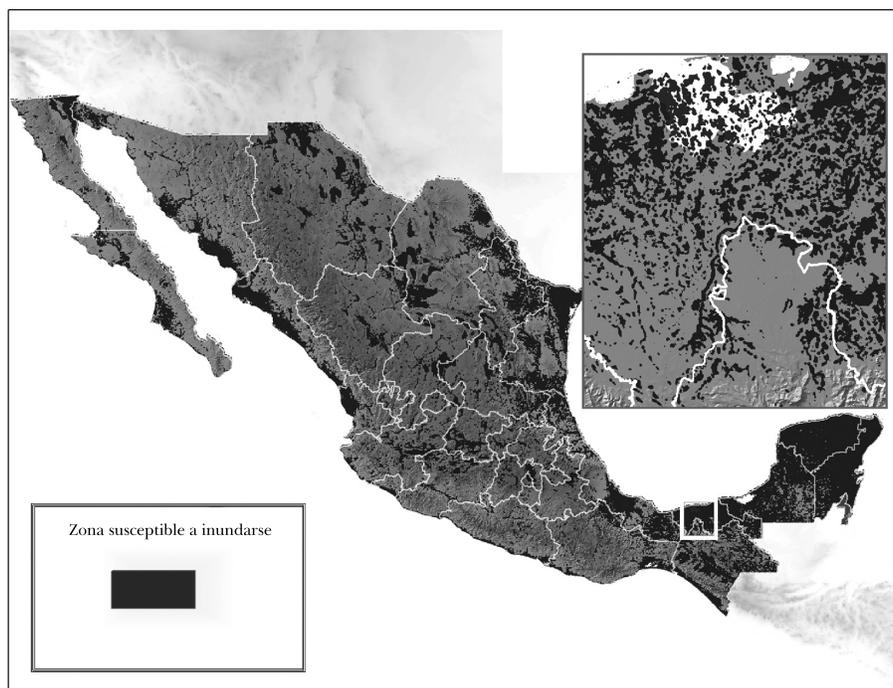


Figura 12. Mapa Nacional Mexicano de Índice de Inundación.

posible identificar estos cuerpos de agua es relevante, pues la metodología no ha incorporado dicha información.

La figura 12 también muestra una ampliación parcial de la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta, donde se puede apreciar que el mapa nacional aparentemente indica que prácticamente toda la región está en riesgo de inundación debido al corto espacio para su impresión, aunque en realidad no ocurre así.

Conclusiones

Se ha propuesto un índice de inundación basado en el Índice Topográfico, que adicionalmente considera aspectos climatológicos, edafológicos y de uso de suelo. El índice tiene como objetivo identificar zonas perennes y efímeramente saturadas o inundadas. El análisis realizado en la Región Hidrológica Lerma-Santiago muestra la efectividad del índice en la identificación de zonas perennemente inundadas, como lagos y ríos. Además, el índice guarda una relación razonable con el mapa de tasas de erosión y el modelo hidrológico-hidráulico de Agroasemex, S.A., en la planicie de inundación de Tabasco.

El índice ha sido clasificado de manera binaria debido a su naturaleza bimodal. Se presenta un mapa nacional que indica zonas perennes o efímeramente inundadas y zonas libres de dicha amenaza. Los resultados son satisfactorios, aunque el tamaño de la impresión impide observar detalles.

Cabe mencionar que el CEM de INEGI tiene severos problemas de continuidad. Los errores son prácticamente imperceptibles cuando se analizan a escala nacional, pero los análisis regionales vuelven evidentes dichas

fallas. Los datos del SRTM están libres de las discontinuidades, y aunque su resolución es relativamente mayor, se considera apropiada para análisis de inundación de grandes extensiones, como el mapa nacional aquí presentado.

Recibido: 12/01/2009

Aprobado: 23/06/2009

Referencias

- BEVEN, K.J. and KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* Vol. 24, no. 1, 1979, pp. 43-69.
- CRESSMAN, G.P. An operational objective analysis system, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 87, 1959, pp. 367-364.
- KIRKBY, M.J., KNEALE, P.E., LEWIS, S.L. and SMITH, R.T. Modelling the form and distribution of peat mires. *Hydrology and Hydrochemistry of British Wetlands*. Hugues, M.R., Heathwaite, A.L. (editors). New York: Wiley, 1995, pp. 83-93.
- MEROT, Ph. and BRUNEAU, P. Sensitivity of bocage landscapes to surface run-off: application of the Kirkby index. *Hydrol. Process.* Vol. 7, 1993, pp. 167-176.
- MESINGER, F., DIMEGO, G., KALNAY, E., MITCHELL, K., SHAFRAN, P., EBISUZAKI, W., JOVIC, D., WOOLLEN, J., ROGERS, E., BERBERY, E., EK, M., FAN, Y., GRUMBINE, R., HIGGINS, W., LI, H., LIN, Y., MANIKIN, G., PARRISH, D. and SHI, W. North American regional reanalysis: a long-term, consistent, high-resolution climate dataset for the North American domain, as a major improvement upon the earlier global reanalysis datasets in both resolution and accuracy. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2006 (enviado para publicación).
- MONTES, L.M., URIBE-ALCÁNTARA, E.M. y GARCÍA-CELIS, E. Mapa Nacional de Erosión Hídrica. *Tecnología en Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*, 2009 (enviado para posible publicación).
- ROHDE, A. and SEIBERT, J. *Wetland occurrence in relation to topography: a test of topographic indices as moisture indicators*. *Agric. For. Meteorol.* 98/99, 1999, pp. 325-340.

Abstract

URIBE-ALCÁNTARA, E.M., MONTES-LEÓN, M.A.L. & GARCÍA-CELIS, E. *National Flood Index Map*. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering en Mexico (in Spanish)*. Vol. I, no. 2, April-June, 2010, pp. 73-85.

Floods are associated with factors such as: 1) river overflow; 2) flash floods, 3) high tides associated with hurricanes; and 4) breakage of control structures. Unfortunately, historical records of floods are practically inexistent. Therefore, risk assessments are generally based on indirect methods such as physical-mathematical modeling. The development of a National Flood Index Map for the identification of regions prone to floods is presented. The index proposed is based on the topographic index developed by Beven (1979) but additionally considers soil, hydrological and climatological factors. The process is detailed for the hydrologic region Lerma-Santiago. In addition, the results are compared with corresponding simulations of a routing model for the floodplain of Tabasco. The results indicate that the index is able to capture reasonably well the perennial and ephemeral flooded regions. The Mexican Flood Index Map based on the proposed methodology is included.

Keywords: flood, index, risk, Mexico, Grijalva-Usumacinta, Lerma-Santiago.

Dirección institucional de los autores

Dr. Edgar Misael Uribe-Alcántara

Consultor Independiente
Calle 663 No.22 Col. CTM Aragón
Delegación Gustavo A. Madero 07990, México D.F.
emural@hotmail.com

M.C. María Alejandrina Leticia Montes-León

Gerencia de Hidráulica e Hidrología
Agroasemex, S.A.
Avenida Constituyentes 124 Pte.
Colonia El Carrizal
76030 Santiago de Querétaro, Querétaro, México
teléfono: + (52) (442) 2381 900, extension 4089
fax: + (52) (442) 2152 300
almontes@agroasemex.gob.mx

Geog. Efraín García-Celis

Gerencia de Geomática
Agroasemex, S.A.
Avenida Constituyentes 124 Pte.
Colonia El Carrizal
76030 Santiago de Querétaro, Querétaro, México
teléfono: + (52) (442) 2381 900, extensión 4404
fax: + (52) (442) 2152 300
efrain7777@hotmail.com