



Elaboración del mapa de Precipitación que Infiltra, hacia la Recarga Hídrica para Centro América

Elaborado por MSc. Javier Saborío Bejarano

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción	4
2. Objetivos	5
3. Área de aplicación.....	5
4. Marco lógico	6
4.1 Método indirectos para estimar la recarga hídrica	8
4.2 El método del balance	9
4.3 El método del balance aplicado por Sistemas de Información Geográfico.....	16
4.3.1 Información requerida	16
4.3.2 Modelos numéricos del terreno y relación con el factor Kp.....	17
4.3.3 Mapas de precipitación que infiltra por país.....	19
5. Procedimientos realizados por países	20
5.1 Honduras	20
5.2 Costa Rica	26
5.3 Guatemala	32
5.4 El Salvador.....	40
5.5 Nicaragua	47
6. Importancia del mapa de recarga hídrica	53
7. Validación del modelo	53
8. Conclusiones	54
9. Recomendaciones	56
10. Bibliografía	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura # 1. Esquema de la zona de recarga hídrica.....	7
Figura # 2. Esquema para el cálculo del Índice de Recarga	19

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro # 1. Valores de propiedades hidráulicas de suelo.....	9
Cuadro # 2. Aproximación de propiedades físicas del suelo	10
Cuadro # 3 Determinación de los parámetros del suelo.....	12
Cuadro # 4. Valores de EVT estimados para la estación Punta Leona.....	13
Cuadro # 5. Balance Hídrico de suelos realizado por hoja electrónica.....	14
Cuadro # 6. Fórmulas del Balance Hídrico de Suelos (BHS) realizado por hoja electrónica	15
Cuadro # 7. Valores del factor Kp, Losilla&Schosinsky, 2000.....	17
Cuadro # 8. Valores del factor Kp, FORGAES, 2006	17
Cuadro # 9. Comparación de rangos de pendientes para el caso de un MNT, Lidar.....	17
Cuadro # 10. Comparación de rangos de pendientes para el caso de un MNT, ASTER, 30 m.....	18
Cuadro # 11. Rangos del factor Kp.....	18
Cuadro # 12. Factor Kv para Honduras	20
Cuadro # 13. Valores del factor KFc	21
Cuadro # 14. Factor Kv para Costa Rica	27
Cuadro # 15. Valores del factor KFc	27
Cuadro # 16. Factor Kv para Guatemala.....	32
Cuadro # 17. Valores del factor KFc	33
Cuadro # 18. Factor Kv para El Salvador	40
Cuadro # 19. Valores del factor KFc para El Salvador.....	41
Cuadro # 20. Factor Kv para Nicaragua	47
Cuadro # 21. Valores del factor KFc	48

1. Introducción

Como parte del Proyecto Iniciativa Global del Agua 2.0/GWI 2 y AGUA VERDE, Catholic Relief Services (CRS), en asocio con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), se elaboró un mapa de precipitación que infiltra y una propuesta metodológica para alcanzar el mapa de “recarga hídrica”, que resultó en un mapa de precipitación que infiltra para los países de Centro América; en el caso de Panamá se hace una aproximación, debido a que no fue posible localizar información de suelos a una escala apropiada.

El mapa de precipitación que infiltra es muy importante como apoyo a la agricultura de secano o de temporal, ya que contribuye a una mejor gestión-protección futura del recurso hídrico en las áreas de mayor infiltración e idealmente en las áreas de recarga hídrica, con el fin de aliviar el problema de inseguridad alimentaria, que se ve influenciado o es más vulnerable debido a la variabilidad climática de la región y la presión del uso de la tierra sobre estas áreas.

La demanda del agua subterránea, sea para consumo humano, u otros usos asociados se ha incrementado en especial debido a la ocupación acelerada de la tierra, el crecimiento poblacional ligado a la falta de una planificación u ordenamiento territorial adecuado, además se ha incrementado por la escasez del recurso hídrico provocada por la variabilidad climática, en algunos casos asociada al cambio climático; en especial debido a que no se requiere de grandes inversiones en cuanto a abastecimientos y sistemas de distribución, aunque a veces, tal el caso de Guatemala se ha hecho más costoso la inversión inicial para llegar a los mantos acuíferos y extraer el agua.

Las ventajas asociadas con el uso del agua subterránea se basan en las siguientes características:
a) es la mayor fuente de agua dulce disponible, por lo cual más de la mitad de la población mundial la utiliza para su consumo-riego; b) tiene excelente calidad natural, pues en general es libre de patógenos, color y turbiedad, y puede ser consumida directamente sin tratamiento, o luego de realizarse un tratamiento simple; por lo general sus fuentes son confiables y no se afectan ante las sequías cortas.

A pesar de la importancia que tiene este recurso, existe un deterioro generalizado de las zonas de la infiltración de la precipitación o de la recarga hídrica causadas por la intervención del hombre, con actividades agropecuarias, industriales, extracción de madera y construcción de viviendas entre otros, en sitios no apropiados y con la implementación de prácticas inadecuadas que al final están incidiendo negativamente en calidad y cantidad de agua en las fuentes superficiales y subterráneas, excluyendo aquellas fuentes muy profundas de agua subterránea donde las actividades superficiales y sub-superficiales no afectan el recurso hídrico.

2. Objetivos

- Elaborar una propuesta metodológica para el mapeo regional de zonas de recarga y priorización de áreas.
- Completar la cartografía y datos para organizar una base de datos cartográficos homogenizada de las variables que necesita la metodología para el mapeo regional de zonas de recarga hídrica.

3. Productos

- **Producto 1.** Desarrollar la metodología para elaborar el mapa y para la priorización de las área de estudio, y una puntuación/rango para identificar las áreas más críticas; siendo su aplicación el año 2014.
- **Producto 2.** Un foro regional con CIAT, CATHALAC y otros actores, así como gobiernos locales para trabajar en la cartografía complementaria. Definir una estrategia de financiamiento para completar el proceso.
- **Producto 3.** Avanzar en realizar el mapa, que consiste en caracterizar los balances hidrológicos y condiciones ecológicas y patrones de uso actual de la tierra

4. Área de aplicación

El área de análisis para la consultoría incluye los países de Guatemala, Honduras, El Salvador, y Nicaragua, agregándose Costa Rica y Panamá siempre que la información esté disponible. En este sentido, se ha incluido Panamá, en forma aproximada dado que no se pudo contar con un mapa de suelos a una escala apropiada.

5. Marco lógico

5.1. Recarga hídrica

Se denomina recarga hídrica al proceso por el cual se incorpora a un acuífero, esto es, una zona del terreno que contiene agua, procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero, si los mismos son externos al acuífero o sistemas de acuíferos en consideración (Custodio 1998). El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar al material geológico o rocoso que presenta diversos grados de saturación. El agua subterránea se mueve lentamente hacia los niveles bajos (a veces millones de años), generalmente en ángulos inclinados y eventualmente llegan a los arroyos, los lagos y los océanos. El factor importante responsable de la existencia del agua subterránea es la gravedad, que atrae al agua hacia el centro de la Tierra, por lo que el agua de la superficie tratará de filtrarse hacia los cimientos de la Tierra, que están constituidos por diferentes tipos de rocas, siendo imprescindible el estudio geológico de la zona en los análisis ocales, lo anterior es un indicativo de que la cuenca hidrográfica no concuerda con la cuenca hidrológica, pues esta última comprende toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo . (Georgia Environmental Protection Division, 1996).

En la Figura # 1 se aprecian las zonas de recarga y descarga a los acuíferos de tipo confinado y no confinado.



Figura # 1. Esquema de la zona de recarga hídrica, tomado de presentación Rep. Dominicana, PNUD, 2010

Para comprender la recarga se debe considerar las fuentes de la recarga, éstas se resumen en:

- Recarga directa o recarga difusa, proveniente del agua lluvia
- Recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros
- Flujos laterales, procedentes de otros acuíferos
- Retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución
- Recarga urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado

4.2. Método indirecto para estimar la recarga hídrica

El uso del flujo base para estimar la recarga se basa en el balance de agua, donde la recarga se iguala a la descarga. La ecuación que más se ha utilizado se basa en el modelo inicial de Losilla&Schosinsky (2000), y replanteado por el denominado método de Recarga de Agua Subterránea “RAS”, PROGAES (2005), que se puede expresar como:

$$R = BC * C$$

Donde:

R = recarga acuífera en mm

BC = Balance climático = P – ETreal

P = precipitación anual en mm

ETreal = Evapotranspiración real estimada anual, en mm

C = Coeficiente de infiltración, adimensional

C = kfc + kp + kv

Kfc = Coeficiente del tipo del suelo

Kp = Coeficiente de pendiente

Kv = Coeficiente del uso del suelo

Este método en realidad define la precipitación que infiltra pues carece de un vínculo con los estratos del agua subterránea y debiera llamarse como “**Índices de recarga o de infiltración**”; existe otro método que ha intentado pesar las variables similares a las del balance, agregando además la variable geológica del área analizada, llamado guía para la determinación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica, CATIE (2010).

En resumen el método indica que la recarga potencial se estima por:

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

Donde:

ZR: zona de recarga potencial

Pend: pendiente y microrelieve

Ts: tipo de suelo

Tr : tipo de roca

Cve: cobertura vegetal permanente

Us: uso del suelo

Los valores de los factores Pend, Ts, Tr, Cve y US se pueden obtener de la referencia indicada y varían de 1 a 5. La propuesta incluye el uso de los modelos existentes unificados en sus criterios de aplicación y el uso de la guía.

4.3. El método del balance

Para lograr la aproximación a la recarga hídrica, el método original de Losilla&Schosinsky (2000), fue modificada por FORGAES, sin embargo el mismo se aplicó de manera simplificada y se varió con criterios, tal como el de los rangos de las pendientes no muy fundamentados en la explicación, así como los valores de otros parámetros en la documentación. Por esta razón se hace un análisis del método inicial, y se propone una metodología a seguir.

Para lo anterior se toma como base el balance de suelos, que se resume en el cálculo de la recarga Potencial de acuíferos, Schosinsky, 2006, y en aplicaciones de Losilla, M, recientes por publicar, 2013.

El **Balance Hídrico de Suelos (BHS)** para determinar la recarga potencial se basa en 2 partes principales:


A) Determinación de coeficiente de infiltración (Cf) de la precipitación que infiltra al subsuelo, y que se compone de varios índices que dependen de:

- ♦ La capacidad de infiltración (Fc) o permeabilidad (K) de los suelos: factor Kfc.
- ♦ La pendiente del terreno o factor Kp
- ♦ La cobertura vegetal o factor Kv
- ♦ La intercepción de lluvia.

Conociendo el “Cf”, se puede determinar el **porcentaje de la lluvia promedio mensual que infiltra** al subsuelo (“Schosinsky, G., Losilla, M., 2000).

En el caso de no contar con información de campo, las características físicas de los suelos se pueden estimar del cuadro No 1, a partir del “Resumen de características físicas de suelos”, publicado por el CIDIAT, 1986.

Cuadro # 1. Valores de propiedades hidráulicas de suelo

Suelos	Clasificación	Fc (cm/hr)	Fc(mm/día)	Capacidad de Campo = CC (%V)	Punto de Marchitez = PM (%V)	Humedad Disponible HDISP % = CC% - PM%
Acillosos	Muy lentas	0.25	60	43.75	21.25	22.5
Limos Arcillas		0.30	72	42.90	20.80	22.1
Arcillo Arenosos		0.40	96	40.30	19.50	20.8
Franco arcillosos		0.80	192	36.45	17.55	18.9
Franco		1.30	312	30.80	14.00	16.8
Franco arenoso		2.50	600	21.00	9.00	12
Arenosos		5.00	1200	14.85	6.60	8.25
Gravas y arenas	Muy rápidas	10.00	2400	10.50	3.50	7.00

Las Fc, CC y PM se tomaron de una estimación de suelos con **textura franco arcilloso** de tabla en Amisial y Jegat, Banco de programas, CIDIAT

Nota:

Los valores de CC y PM, de la tabla se dan en % V (% por volumen)

La CC y PM en mm (milímetros), depende del espesor de suelo de raíces utilizado, según el cultivo o uso del suelo promedio de la zona del balance.

B) Determinación de la recarga por el BHS

El balance hídrico de suelos se basa en cuantificación de las entradas y salidas de agua al sistema suelo y sus cambios de almacenamiento. Es necesario conocer o estimar las características físicas del suelo, tales como permeabilidad (K) o coeficiente de infiltración (Fc), capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM) y la profundidad efectiva de raíces.

Acá el punto clave lo constituyen las profundidades de las raíces, los espesores del suelo varían generalmente entre 0.4 y 2,0 metros. Luego el %V de CC y PM, se multiplica por ese espesor de suelo. El %V de CC y PM, se multiplica por ese espesor de suelo y resulta en CC y PM en mm. Tratando de asociar profundidades de suelos a textura, M Losilla, 2013, ha utilizado la información que se muestra en el Cuadro No 2.

Cuadro # 2. Aproximación de propiedades físicas del suelo

TEXTURAS	PROFUNDIDAD (mm)	Capacidad de Campo = CC (mm)	Punto de Marchitez = PM (mm)
Arcillosos	1000	437.5	212.5
Limo/arcillas	800	343.2	166.4
Arcillo/arenoso	750	302.3	146.3
Franco arcilloso	500	182.3	87.8
Franco	400	123.2	56.0
Fanco arenosos	300	63.0	27.0
Arenosos	200	29.7	13.2
Gravas	100	10.5	3.5

Además debe conocerse la precipitación y evapotranspiración media mensual de la región hidrogeológica a calcular.

Entre las variables que se utilizan y resultados que se obtienen en el modelo analítico implementado en una hoja electrónica están:

- P = precipitación media del sector (dato de entrada)
- Cf = coeficiente de infiltración (dato de entrada)
- Pi = precipitación que infiltra (resultado intermedio)
- Pe = precipitación que escurre (resultado final secundario)
- ETP = evapotranspiración potencial (dato de entrada)
- HSi = humedad de suelo inicial (condición asignada)
- AgD = agua disponible después de ETP (resultado intermedio)
- HSf = humedad de suelo final (resultado intermedio)
- cHS = cambio de humedad de suelo
- DCC = déficit de capacidad de campo (resultado intermedio)
- Rp = recarga potencial al acuífero (resultado final principal)
- ETR = evapotranspiración real (resultado final secundario)
- NR = necesidad mínima de riego (resultado final secundario)

La Evapotranspiración Potencial (ETP), se puede calcular, por el método de la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), que utiliza solamente los datos de temperatura y radiación solar, o bien por la fórmula del balance de Holdridge, en función de la precipitación y la elevación (Rodríguez A., Saborío J., 1983). En Centro América se han aplicado también los métodos de basados en la temperatura del aire, de Thornthwaite, o bien el Blaney Criddle, basado en el uso consuntivo de las coberturas-uso de la tierra (MOPTMA, 1995).

Acá hay otra diferencia con el método RAS de FORGAES, que plantea al balance en función de la Evapotranspiración Real. En nuestro caso se usará el planteamiento inicial de Losilla&Schosinky, (2000), aplicando el balance en función de la evapotranspiración potencial como dato de entrada, pudiéndose obtener la evapotranspiración real como un resultado secundario.

Para la determinación del BHS, normalmente se ha aplicado en una combinación de cuencas o regiones hidrográficas con sus unidades hidrogeológicas, en nuestro caso se hará a nivel nacional por cada país. Antes de aplicar el Balance Hídrico de Suelos, conviene recordar, como se ha aplicado el método inicial a través de una hoja electrónica y en forma mensual.

Aplicación práctica del BHS

Se seguirá un caso práctico real, documentado por el MSc. Marcelino Losilla, 2013, consiste en determinar la Recarga Directa Potencial a Unidad de Acuicludos y Acuíferos pobres en un sector central del cantón de Garabito, en Puntarenas, Costa Rica

Paso 1. Determinación de los parámetros del suelo, por tablas de Jegat&Amisial.

Es necesario determinar los valores de capacidad de campo, punto de marchitez y humedad disponible, del área bajo análisis.

Cuadro # 3 Determinación de los parámetros del suelo

Unidad Acuicludos y Acuíferos pobres en Rocas Sedimentarias y Volcánicas Pre-Cuaternarias : Sector Central, Cantón Garabito
Estación Pta. Leona // Coord.: Latitud: 09° 42' N; Longitud: 84°39' O
Elevación: 20 msnm
Textura de suelo = Arcillo Arenosos
Capac.infiltrac.(Fc)= 0.40 cm/hr = 60 mm/d (Cuadro No 1)
Prof. raíces media(mm)= 750 mm
Capac.campo(CC) [%]=40.3 CCv= 40.3 * 750 = 302,25 mm (Cuadro 2)
Pto.marchitez (PM)[%]= 19.5 PMv= 19.5* 750 = 146,25 mm (Cuadro 2)
HDISP = CC - PM= 302.3 - 146.25 = 156,0 mm

Paso 2. Cálculo del coeficiente de infiltración (Cf)

El coeficiente de infiltración se calcula como $C_f = 0.88 C$, donde:

$$C = K_p + K_v + K_{fc}$$

Donde:

- K_p = Coeficiente de pendiente, se estima en 0.10, dado que las pendiente del área se ubica entre 2 y 7%
- K_v = Coeficiente del uso del suelo, considerando charrales, pastos y cultivos = 0.19
- K_{fc} = Coeficiente del tipo del suelo y se calcula por $K_{fc} = 0.267 \ln(F_c) - 0.000154 F_c - 0.723$, con F_c obtenido del cuadro No 1, en esta caso para suelos arcillosos arenosos $F_c = 0.50 \text{ cm/hr} = 120 \text{ mm/día}$, esto es, $K_{fc} = 0.267 \ln(120) - 0.000154 * 120 - 0.723 = 0.536780295$

$$\rightarrow C = K_p + K_v + K_{fc} = 0.1 + 0.19 + 0.537 = 0.827$$

$$\text{De donde } C_f = 0.88 * C = 0.88 * 0.827 = 0.72776$$

Paso 3. Cálculo de la evapotranspiración potencial (EVP)

Para este caso se estimó la EVP Como se indicó la EVP se puede calcular por diversos métodos. En este caso con Hargreaves se obtiene:

Cuadro # 4. Valores de EVT estimados para la estación Punta Leona

Variables	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTALES
P (mm)	41.5	30.7	15.2	92.7	279.4	281.2	310.8	323.6	344.3	492.6	238.2	58.6	2508.8
ETP	158.5	159.2	189.9	182.9	164.6	146.6	152.7	155.1	143.9	142.1	129.7	140.9	1866.1

Paso 4. Balance mensual por hoja electrónica

Ahora tenemos la información para el BHS a nivel mensual, en el Cuadro # 5 se incluye el cálculo del BHS a nivel mensual.

En el Cuadro # 5 se incluye la hoja electrónica con el cálculo paso a paso del balance de suelos, en el Cuadro # 6 las fórmulas en Excel correspondientes a cada uno de los cálculos. Los valores en amarillo deben ser conocidos previamente para hacer realizar el balance.

Cuadro # 5. Balance Hídrico de suelos realizado por hoja electrónica

Textura de suelo = arcillo arenoso														
Capac infiltrac (Fc) = 0.40 cm/hr = 96 mm/d	96													
Capac campo (CC) = 40.3 CCv	302.25													
Pto marchitez (PM)	146.25													
CC-PM	156													
His inicial Eneero	52.6													
Variables	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTALES	
P (mm)	41.5	30.7	15.2	92.7	279.4	281.2	310.8	323.6	344.3	492.6	238.2	58.6	2508.8	
Cf	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
Pi = P * Cf	26.6	19.6	9.7	59.3	178.8	180.0	198.9	207.1	220.4	315.3	152.4	37.5	1605.6	
Pe (mm) = precipitación que escurre	14.9	11.1	5.5	33.4	100.6	101.2	111.9	116.5	123.9	177.3	85.8	21.1	903.2	
ETP	158.5	159.2	189.9	182.9	164.6	146.6	152.7	155.1	143.9	142.1	129.7	140.9	1866.1	
HSi(mm)= humedad del suelo inicial	52.6	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	47.6	93.8	145.8	156.0	156.0	156.0		
AgD (mm) = agua disponible despues de ETP	-131.9	-139.6	-180.2	-123.6	14.2	33.4	46.2	52.0	76.5	173.2	22.7	-103.4	642.7	
B10 Resp	-79.3	-139.6	-180.2	-123.6	14.2	47.6	93.8	145.8	222.3	329.2	178.7	52.6		
HSf (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	47.6	93.8	145.8	156.0	156.0	156.0	52.6		
cHS (mm)	-52.6	0.0	0.0	0.0	14.2	33.4	46.2	52.0	10.2	0.0	0.0	-103.4	0.0	
DCC(mm) = déficit capacidad de campo	95.0	95.0	95.0	95.0	80.8	47.4	1.2	-50.8	-61.0	-61.0	-61.0	42.4		
Rp (mm) = recarga potencial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.3	173.2	22.7	0.0	262.2	
ETR (mm)	79.2	19.6	9.7	59.3	164.6	146.6	152.7	155.1	143.9	142.1	129.7	140.9	1343.5	
NT (mm) = necesidad de riego	95.0	95.0	95.0	95.0	80.8	47.4	1.2	-50.8	-61.0	-61.0	-61.0	42.4	318.0	

La recarga estimada es de 262.2 mm, esto es un 10.4% de la precipitación, con una precipitación que escurre del 36%. Si se aplicara como en forma anual y haciendo el balance solo con la ETP, la recarga se estimaría en 411.3 esto es un 16.4%. Si aplicáramos la ETR como el método de FORGAES se lograría un $BC = P - ER = 2508.8 - 1343.5 = 1165.3$, y $R = BC * Cf = 699.2$, esto es un 35.9% de la precipitación.

Es evidente que el método de FORGAES aplicado a nivel anual aumenta la recarga, y que el método clásico también pero en menor porcentaje.

Cuadro # 6. Fórmulas del Balance Hídrico de Suelos (BHS) realizado por hoja electrónica

Textura de suelo = arcillo arenoso													
Capac infiltrac (Fc) = 0.40 cm/hr = 96 mm/d	=0.4*24*10												
Capac campo (CC) = 40.3 CCv	302.25												
Pto marchitez (PM)	146.25												
CC-PM	=+B3-B4												
His inicial Enero	52.6												
Variables	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTALES
P (mm)	41.5	30.7	15.2	92.7	279.4	281.2	310.8	323.6	344.3	492.6	238.2	58.6	=SUMA(B8:M8)
Cf	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	
Pi = P * Cf	=+B8*B9	=+C8*C9	=+D8*D9	=+E8*E9	=+F8*F9	=+G8*G9	=+H8*H9	=+I8*I9	=+J8*J9	=+K8*K9	=+L8*L9	=+M8*M9	=SUMA(B10:M10)
Pe (mm) = precipitación que escurre	=+B8-B10	=+C8-C10	=+D8-D10	=+E8-E10	=+F8-F10	=+G8-G10	=+H8-H10	=+I8-I10	=+J8-J10	=+K8-K10	=+L8-L10	=+M8-M10	=SUMA(B11:M11)
ETP	158.5	159.2	189.9	182.9	164.6	146.6	152.7	155.1	143.9	142.1	129.7	140.9	=SUMA(B12:M12)
HSi (mm) = humedad del suelo inicial	=+B6	=+B13+B17	=+C13+C17	=+D13+D17	=+E13+E17	=+F13+F17	=+G13+G17	=+H13+H17	=+I13+I17	=+J13+J17	=+K13+K17	=+L13+L17	
Agd (mm) = agua disponible despues de ETP	=+B10-B12	=+C10-C12	=+D10-D12	=+E10-E12	=+F10-F12	=+G10-G12	=+H10-H12	=+I10-I12	=+J10-J12	=+K10-K12	=+L10-L12	=+M10-M12	=+N8-N12
B10 Resp	=+B13-B14	=+B16+C14	=+C16+D14	=+D16+E14	=+E16+F14	=+F16+G14	=+G16+H14	=+H16+I14	=+I16+J14	=+J16+K14	=+K16+L14	=+L16+M14	
HSf (mm)	=SI(B15 < 0, 0, SI(B15>156,156, B15))	=SI(C15 < 0, 0, SI(C15>156,156, C15))	=SI(D15 < 0, 0, SI(D15>156,156, D15))	=SI(E15 < 0, 0, SI(E15>156,156, E15))	=SI(F15 < 0, 0, SI(F15>156,156, F15))	=SI(G15 < 0, 0, SI(G15>156,156, G15))	=SI(H15 < 0, 0, SI(H15>156,156, H15))	=SI(I15 < 0, 0, SI(I15>156,156, I15))	=SI(J15 < 0, 0, SI(J15>156,156, J15))	=SI(K15 < 0, 0, SI(K15>156,156, K15))	=SI(L15 < 0, 0, SI(L15>156,156, L15))	=SI(M15 < 0, 0, SI(M15>156,156, M15))	
chs (mm)	=+B16-B13	=+C16-C13	=+D16-D13	=+E16-E13	=+F16-F13	=+G16-G13	=+H16-H13	=+I16-I13	=+J16-J13	=+K16-K13	=+L16-L13	=+M16-M13	=SUMA(B17:M17)
DCC (mm) = déficit capacidad de campo	=+B2-1	=+B18-C17	=+C18-D17	=+D18-E17	=+E18-F17	=+F18-G17	=+G18-H17	=+H18-I17	=+I18-J17	=+J18-K17	=+K18-L17	=+L18-M17	
Rp (mm) = recarga potencial	=+SI(B14-B17<0,0, B14-B17)	=+SI(C14-C17<0,0, C14-C17)	=+SI(D14-D17<0,0, D14-D17)	=+SI(E14-E17<0,0, E14-E17)	=+SI(F14-F17<0,0, F14-F17)	=+SI(G14-G17<0,0, G14-G17)	=+SI(H14-H17<0,0, H14-H17)	=+SI(I14-I17<0,0, I14-I17)	=+SI(J14-J17<0,0, J14-J17)	=+SI(K14-K17<0,0, K14-K17)	=+SI(L14-L17<0,0, L14-L17)	=+SI(M14-M17<0,0, M14-M17)	=SUMA(B19:M19)
ETR (mm)	=+B10+B13	=+C10+C13	=+D10+D13	=+E10+E13	=+F10+F13+F12, F12, F10+F13	=+G10+G13+G12, G12, G10+G13	=+H10+H13+H12, H12, H10+H13	=+I10+I13+I12, I12, I10+I13	=+J10+J13+J12, J12, J10+J13	=+K10+K13+K12, K12, K10+K13	=+L10+L13+L12, L12, L10+L13	=+M10+M13+M12, M12, M10+M13	=SUMA(B20:M20)
NT (mm) = necesidad de riego	=+B18	=+C18	=+D18	=+E18	=+F18	=+G18	=+H18	=+I18	=+J18	=+K18	=+L18	=+M18	=SUMA(B21:M21)

4.3 El método del balance aplicado por Sistemas de Información Geográfico

Para aplicar el método del balance por SIG se requiere contar con cada uno de los mapas iniciales, ya convertidos a los valores de los coeficientes.

Esto implica contar con balances mensuales de entradas y pérdidas de las variables climáticas, o sea la lluvia mensual y la evapotranspiración potencial, además de los parámetros de propiedades del suelo.

A pesar de sus bondades existe un vacío en la región en cuanto a sus mediciones e intentos poco fiables de demarcar los acuíferos y sus respectivas áreas de recarga-descarga, salvo para acuíferos muy locales en áreas urbanas y otros siguiendo objetivos específicos, en Costa Rica por parte de AyA y SENARA y algunos valles en Nicaragua por la Universidad Nacional de Nicaragua, en El Salvador han investigado y modelado varios acuíferos por UES- El Salvador, así como algunas evaluaciones en Guatemala. Prácticamente no existen mapas de acuíferos bien delimitados en la región y solo intentos a través de métodos indirectos de evaluar la precipitación que infiltra o la recarga del agua.

4.3.1 Información requerida

La información básica requerida para confeccionar el mapa de recarga ha venido mejorando en la región, en la actualidad la tecnología ha provisto información digital que permite una mejor modelación espacial del territorio.

Para este estudio se cuenta con:

- Modelo numérico del terreno, en este caso un modelo de 30 metros de pixel, ASTER para toda el área. En el caso de Guatemala, hay un modelo de 15 metros, y El Salvador cuenta con una interpolación a 10 metros, producto de una cartografía digital
- Mapa de series de suelos, a escalas 1:200,000 y 1:250,000 para Guatemala
- Mapa de uso-cobertura de la tierra, que varían en escalas y fechas de realización.
- Datos climáticos: lluvia-evaporación. Se trabajará con balances existentes en la región y datos medidos en los países, por cuanto los análisis iniciales de los estimadores tipos TRMM, no reflejan las condiciones y microclimas locales en cada país.

Otra información, útil para la verificación del mapa y la presentación de resultados, lo constituyen:

- a. unidades geológicas,
- b. hidrogeológica,

- c. delimitación de acuíferos,
- d. cuencas hidrográfica,
- e. información de pozos y nacientes,
- f. información de concesión de agua, y cartografía básica digital: ríos vía, centros poblados.

4.3.2 Modelos numéricos del terreno y relación con el factor Kp

Los planteamientos iniciales del método del Balance Hídricos de Suelos (BHS) se realizaron por experimentación en parcelas dónde se conocía la pendiente y se determinaron los siguientes coeficientes, Cuadro # 7 y Cuadro # 8.

Cuadro # 7. Valores del factor Kp, Losilla&Schosinsky, 2000

Losilla&Schosinsky	
Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²
0.02 - 0.06	30
0.06 - 0.4	20
0.4 - 2	15
2 - 7	10
> 7	6

Cuadro # 8. Valores del factor Kp, FORGAES, 2006

RAS, FORGAES	
Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²
0 - 1	40
1 - 15	15
15 - 30	10
30 - 50	7
59 - 70	5
> 70	1

Dado que los valores que interesan para la infiltración son los de las pendientes bajas pareciera que los planteamientos de FORGAES, 2006, tienden a favorecer aquellas áreas de mayor pendiente a las que se les da un peso mayor que las del método original. Además con el propósito de analizar cómo se comporta la clasificación respecto a los modelos numéricos del terreno, se efectuaron pruebas considerando: a) Lidar de 1 metro, b) Aster de 30 metros, éste último como el modelo a emplear. En el Cuadro # 9 se incluyen la comparación, dónde también se agregaron los rangos de la Guía del CATIE, 2010.

Cuadro # 9. Comparación de rangos de pendientes para el caso de un MNT, Lidar

Losilla&Schosinsky			RAS			Guía CATIE			Propuesta		
Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Ha)	Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Ha)	Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Ha)	Rangos (%)	Puntaje	Area (Ha)
0.02 - 0.06	30	452.9	0 - 1	40	452.9	0 - 6	5	452.9	0 - 1	30	452.9
0.06 - 0.4	20		1 - 15	15	0.0	6 - 15	4	0.0	1 - 7.5	20	0.0
0.4 - 2	15		15 - 30	10	119.7	15 - 45	3	233.7	7.5 - 15	15	113.2
2 - 7	10		30 - 50	7	258.7	45 - 65	2	389.8	15 - 45	10	120.5
> 7	6	821.8	59 - 70	5	245.1	> 65	1	198.2	> 45	6	588.1
			> 70	1	198.2						
Total		1274.6			1274.6			1274.6			1274.6

Obsérvese que para el caso de un modelo numérico del terreno de 1 metro, los valores que importan están en el rango de 0.02 a 0.06%, más aún de 0 a 1% y de 0 a 6% se mantiene el mismo peso. No es sino hasta 7% que las pendientes se empiezan a considerar en el método inicial.

Obsérvese que de 6 a 15% no hay áreas representativas, por lo que pareciera que bastaría con pesar las área de 0 a 1% para tener le mejor representatividad de las áreas susceptibles a infiltración.

Ahora revisemos contra los datos del modelo numérico que se va a utilizar, que es similar al modelo numérico de El Salvador, que se llevó a 10 metros de pixel, pero sobre una base de 1:25,000.

Cuadro # 10. Comparación de rangos de pendientes para el caso de un MNT, ASTER, 30 m

Losilla&Schosinsky			RAS			Guía CATIE			Propuesta		
Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Km2)	Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Km2)	Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Km2)	Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²	Area (Ha)
0.02 - 0.06	30	741.8	0 - 1	40	1485.5	0 - 6	5	5219.3	0 - 1	30	1485.5
0.06 - 0.4	20		1 - 15	15	38146.8	6 - 15	4	14075.7	1 - 7.5	20	18828.9
0.4 - 2	15	3167.0	15 - 30	10	30727.3	15 - 45	3	53097.4	7.5 - 15	15	19318.0
2 - 7	10	15287.9	30 - 50	7	27409.8	45 - 65	2	23439.2	15 - 45	10	53097.4
> 7	6	92827.9	59 - 70	5	10598.0	> 65	1	16193.2	> 45	6	19294.9
			> 70	1	3657.3						
Total		112024.6			112024.6			112024.6			112024.6

Luego de varias pruebas se escogieron los rangos en Cuadro # 11, que son los que usarán para la aplicación del método Losilla&Schosinsky, 2000.

Cuadro # 11. Rangos del factor Kp

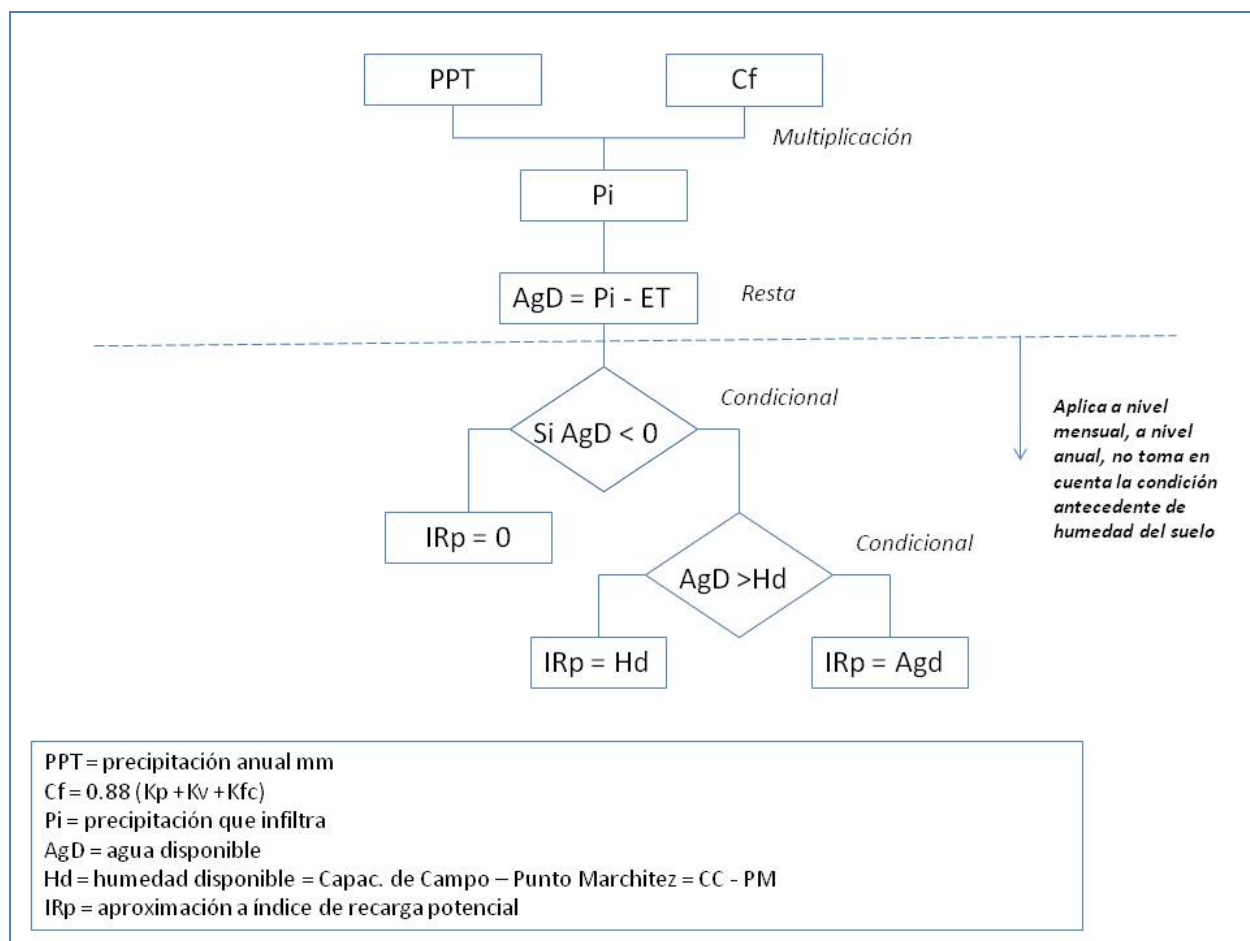
Rangos del Factor Kp	
Rangos (%)	Puntaje x 10 ⁻²
0 - 1	30
1 - 7.5	20
7.5 - 15	15
15 - 45	10
> 45	6

4.3.3 Mapas de precipitación que infiltra por país

Como se indicó en esta primera fase se aplicará la metodología en forma anual, por cuanto no se cuenta con la información necesaria para realizar el balance hídrico mensual de suelos. Aunque es una aproximación, el resultado puede que sobreestime los valores, pero da una idea cualitativa más que cuantitativa de la recarga hídrica potencial aproximada o índice de recarga. Lo ideal sería hacer a como balance a nivel mensual, pero por limitantes de información esto quedara para otra fase.

En la Figura # 2, se incluye el esquema para el cálculo del índice de recarga.

Figura # 2. Esquema para el cálculo del Índice de Recarga



5. Procedimientos realizados por país

5.1 Honduras

Procedimiento

Determinación del coeficiente de infiltración (Cf)

El coeficiente de infiltración se calculó por la formula $Cf = 0,88 C$

Donde $C = Kp + Kv + Kfc$

Kp está en función de las pendientes, según el Cuadro # 11.

Kv está en función de la cobertura vegetal, en el Cuadro # 12 se incluyen los valores que se utilizaron.

Cuadro # 12. Factor Kv para Honduras

Uso - cobertura tierra	Kv
Agricultura Tecnicada_Semitecnif.	0.10
Agricultura Tradicional-Matorral	0.10
Asentamientos Humanos	0.05
Bosque Conifera - Pino	0.18
Bosque de Coníferas Denso	0.20
Bosque de Coníferas Ralo	0.18
Bosque de Mangle	0.01
Bosque Latifoliado	0.16
Bosque Mixto	0.16
Cuerpos de Agua	0.00
Pastizalas - Sabanas	0.05
Suelos Desnudos	0.05
Tierras Sin Bosque	0.10

El factor Kfc está en función de los suelos, dado que se usa el mapa de Simmons, la reclasificación final se hace acorde a las texturas, con el Cuadro # 13.

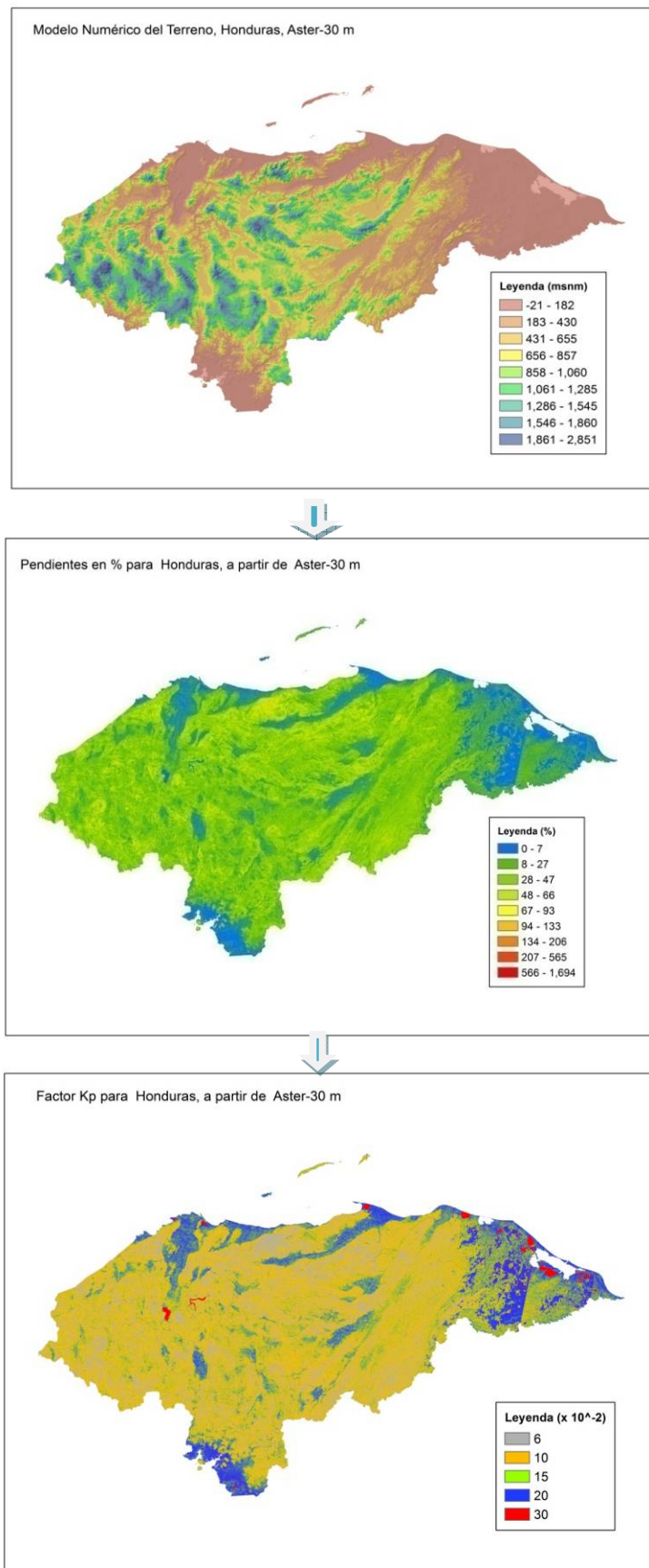
Cuadro # 13. Valores del factor KFc

SIMBOLO	TIPO	TEXTURA1	TEXTURA2	Disponibilidad agua (%)	Kfc x 100 ⁻²
Ah	AHUAS	silt-loam	limos margas	22.5	15
Aw	AHUASBILLA	silty-loam	margas limosas	25	20
AF	ALLUVIALS	clay	arcillas	30	10
AG	ALLUVIALS	sand	arenas	15	40
AM	ALLUVIALS	silt	limos	20	15
AS	ALLUVIALS	sand silt clay	arenas limos arcillas	15	40
AP	ARENAS DE PLAYAS	sand	arenas	15	40
Bw	BILWI	Gravel&sand/silt	gravas y arenas limos	20	15
Co	COCONA	silty-sand	arenas limosas	15	40
Cr	CORAY	silty-loam	margas limosas	25	20
Cy	COYOLAR	silty-loam&silty sand	margas limosas y arenas limosas	20	15
Cha	CHANDALA	silty-sand&s-c	arenas limosas y limos arcillas	22.5	15
Chi	CHIMBO	Chimbo	chimbo	22.5	15
Chz	CHIMIZALES	silty-loam	margas limosas	25	20
Chn	CHINAMPA	vf s-clay/sc-sand	limos arcillas/limos arcillas arenas	20	15
Da	DANLI	silty-loam	margas limosas	25	20
Es	ESPARIGUAT	silt/sand/gravel	limos, arenas y gravas	15	40
Gu	GUAYMACA	silty-loam&Gravel	margas limosas y gravas	12.5	40
Ja	JACALEAPA	s-clay/silty-loam	arcillas limosas/cienos limosos	25	20
Mi	MILILE	silty-loam	margas limosas	25	20
Na	NARANJITO	silty-loam&scl	margas limosas y limos arcillas	22.5	15
Oj	OJOJONA	silty-sand&silty-loam	arenas limosas y margas limosas	20	15
Or	ORICA	s-clay	limos y arcillas	22.5	15
PM	PANTANOS Y CIENAGAS	clay	arcillas	30	10
Pe	PESPIRE	clay-loam	arcilla marga	30	10
Sa	SALALICA	silty-clay-loam	arcillas marga limosas	25	15
Si	SILMACIA	silty-loam/scl	margas limosas/limos arcillas	22.5	15
Ss	SISIN	silty-sand	arenas limosas	15	40
SV	SUELOS DE LOS VALLES	s-clay	limos y arcillas	22.5	15
Su	SULACO	clay	arcillas	30	10
Ta	TOMALA	silty-loam	margas limosas	25	15
To	TOYOS	silty-loam&scl	margas limosas y limos arcillas	22.5	15
Ur	URUPAS	silty-loam/scl	margas limosas y limos arcillas	22.5	15
Ya	YARUCA	silty-clay&scl	arenas limosas y limos arcillas	22.5	15
Yu	YAUUYUPE	clay	arcillas	30	10
Yo	YOJOA	silty-loam&scl	margas limosas y limos arcillas	22.5	15
Nulo	Nulo	water	masas de agua	100	0

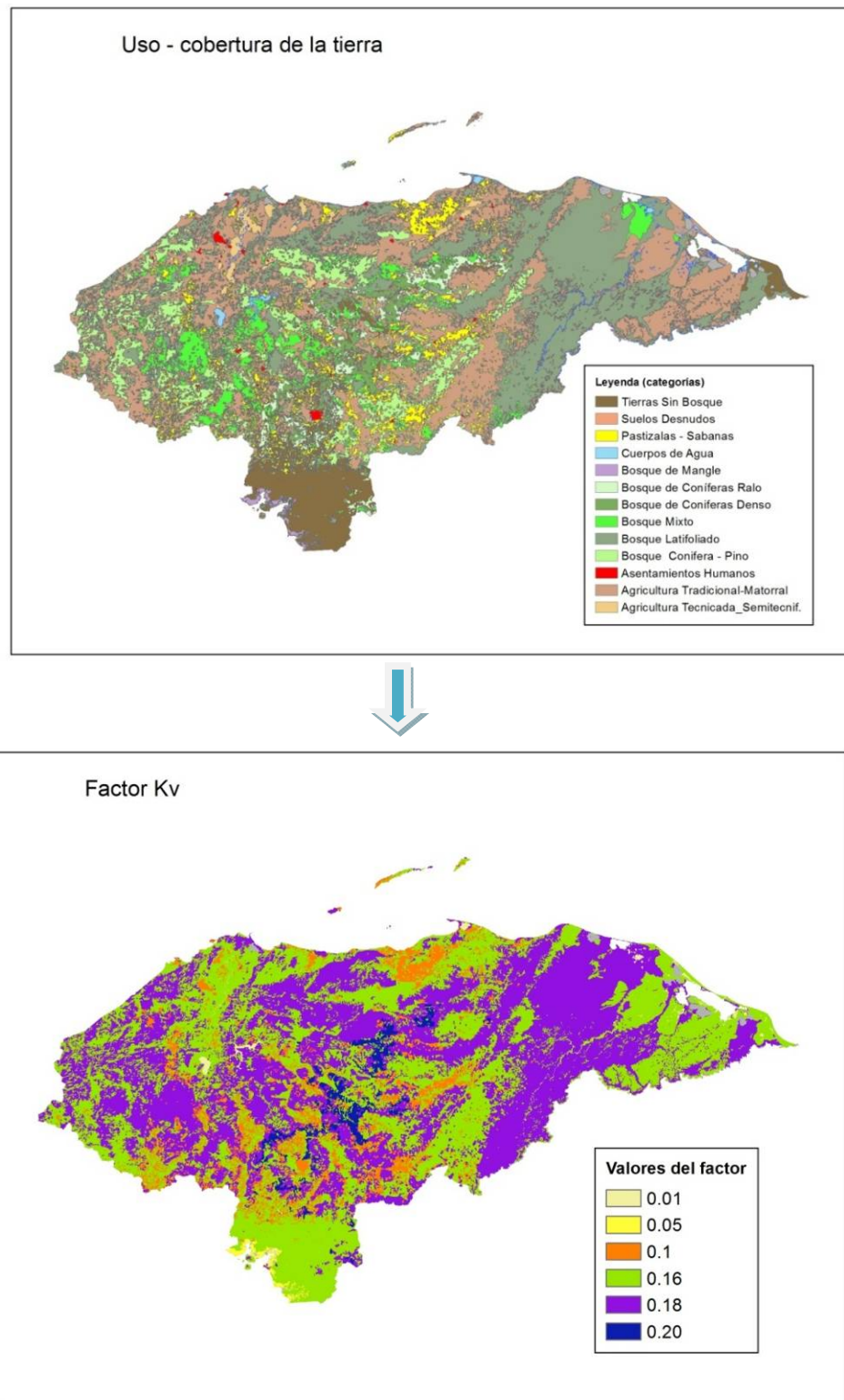
Elaboración propia, con base al Balance Hídrico, Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente, 2004?

Los valores de la disponibilidad del agua son del SNET, 2010.

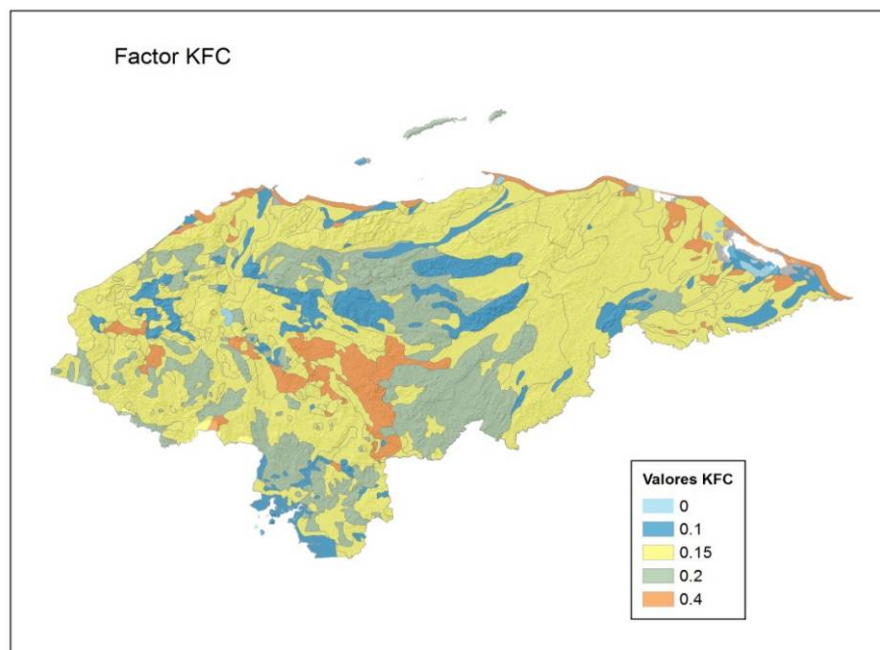
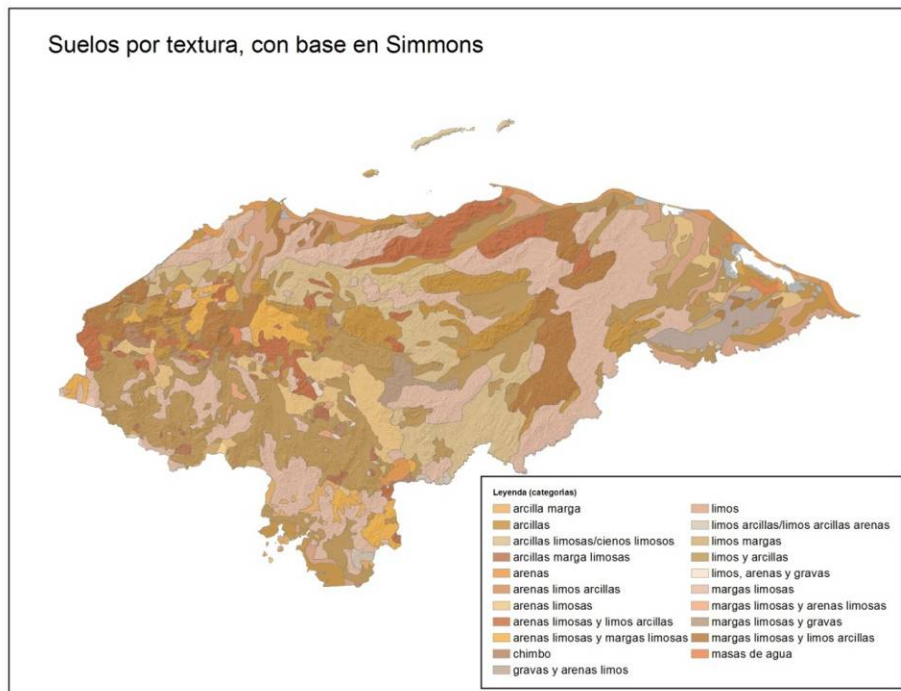
Factor Kp en función del modelo de elevación digital para Honduras



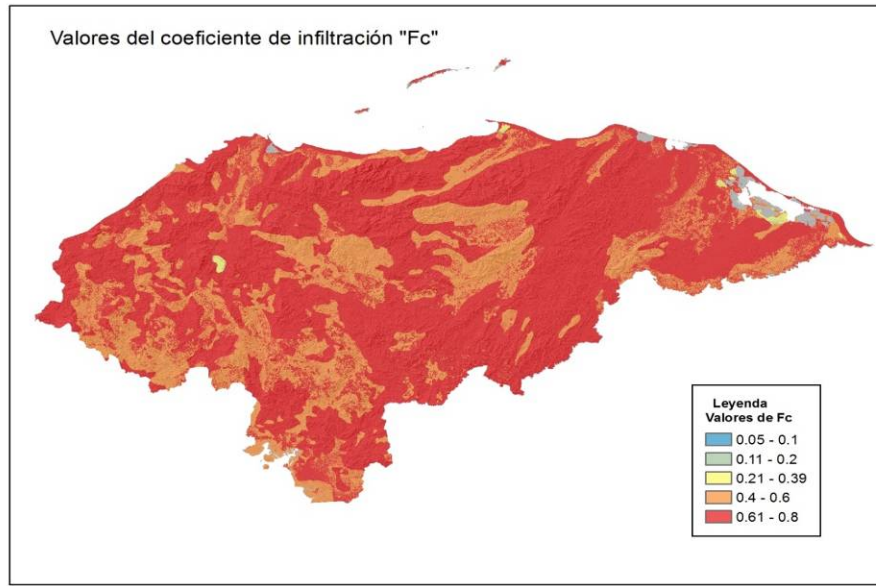
Factor Kv en función de la cobertura de la tierra para Honduras



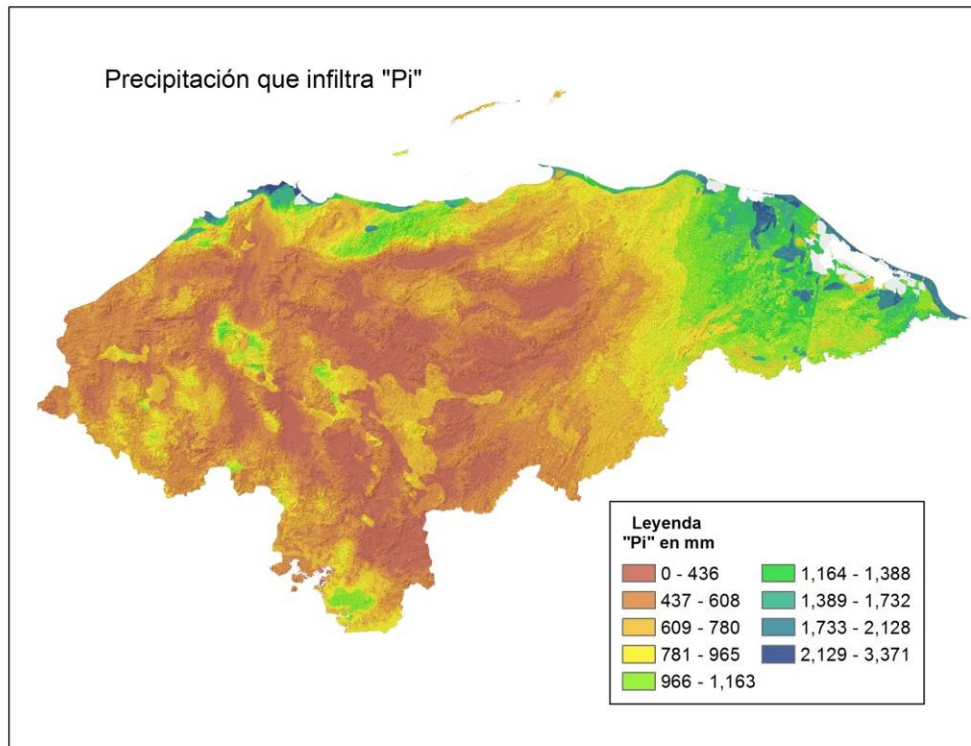
Factor KFc en función del mapa de suelos de Simmons modificado, para Honduras



Finalmente se obtiene el coeficiente de infiltración o factor $F_c = 0.88 C$, donde $C = K_p + K_v + K_{FC}$



Mapa de la precipitación que infiltra para Honduras



5.2 Costa Rica

Procedimiento

Determinación del coeficiente de infiltración (Cf)

El coeficiente de infiltración se calcula por la formula $Cf = 0,88 C$

Donde $C = Kp + Kv + Kfc$

Kp está en función de las pendientes, según el cuadro 11.

Kv está en función de la cobertura vegetal, en el Cuadro # 14 se incluyen los valores que se utilizaron.

Cuadro # 14. Factor Kv para Costa Rica

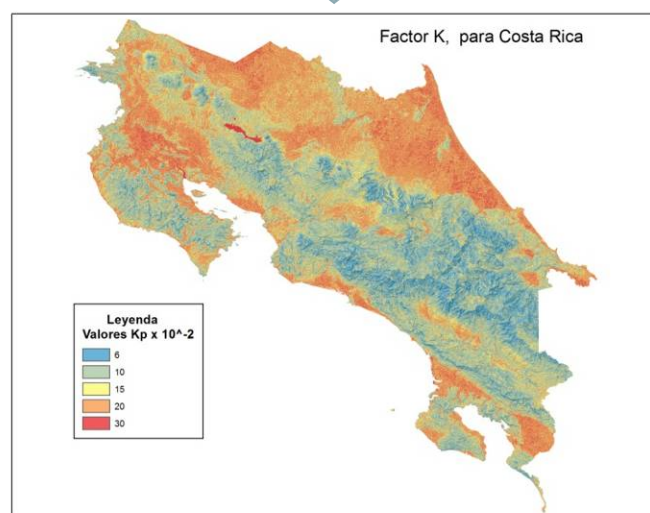
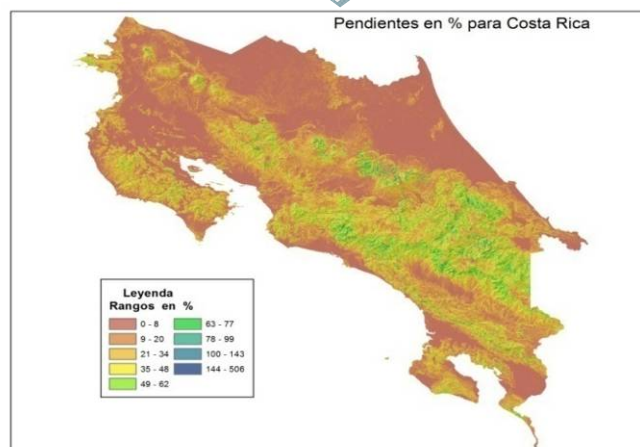
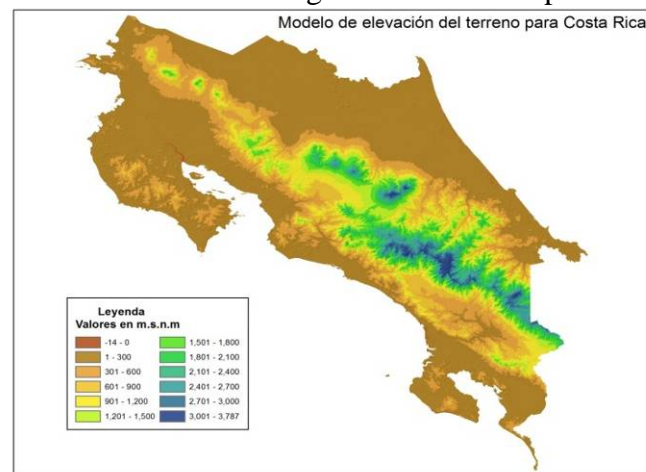
Uso - Cobertura de la tierra	KV100	KV
Area urbana	5	0.05
Areas fronterizas	17	0.17
Areas quemadas	10	0.10
Bosque primario	20	0.20
Bosque secundario	18	0.18
Cultivos anuales	10	0.10
Cultivos permanentes	10	0.10
Humedales	1	0.01
Lagunas y embalses	0	0.00
Manglar	5	0.05
Paramos	18	0.18
Pastos	17	0.17
Pastos y agricultura	10	0.10
Rios	0	0.00
Tacotal y charral	16	0.16
Terreno descubierto	10	0.10
Terrenos rocosos	5	0.05
Uso mixto	15	0.15

Kfc está en función de los suelos, dado que se usa el mapa de suelos de Costa Rica, escala 1:200,000, Alexis V., 1990, la reclasificación final se hace acorde a las texturas, con el Cuadro # 15.

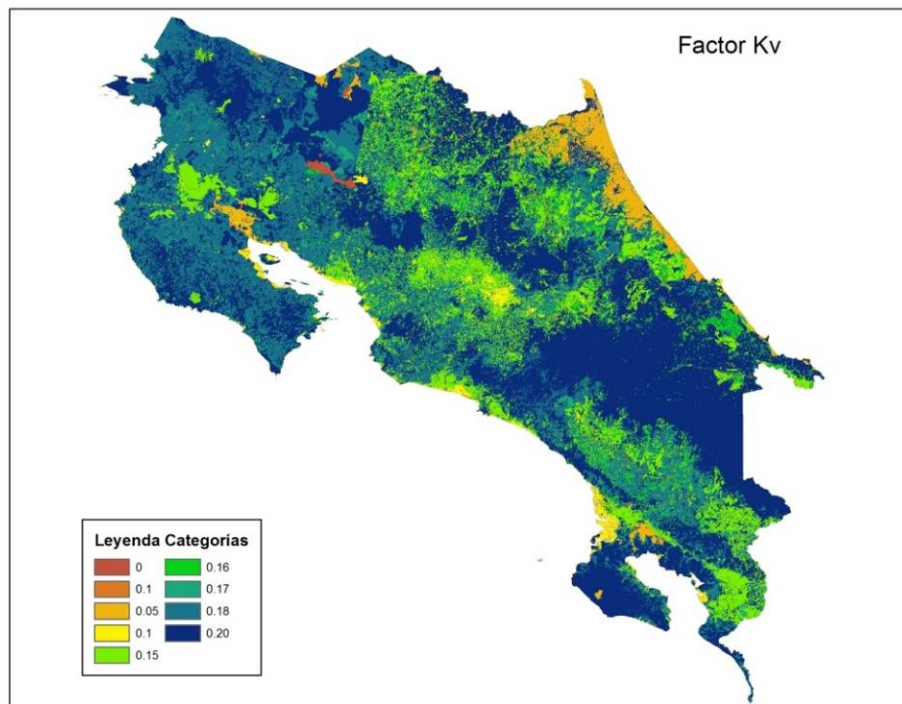
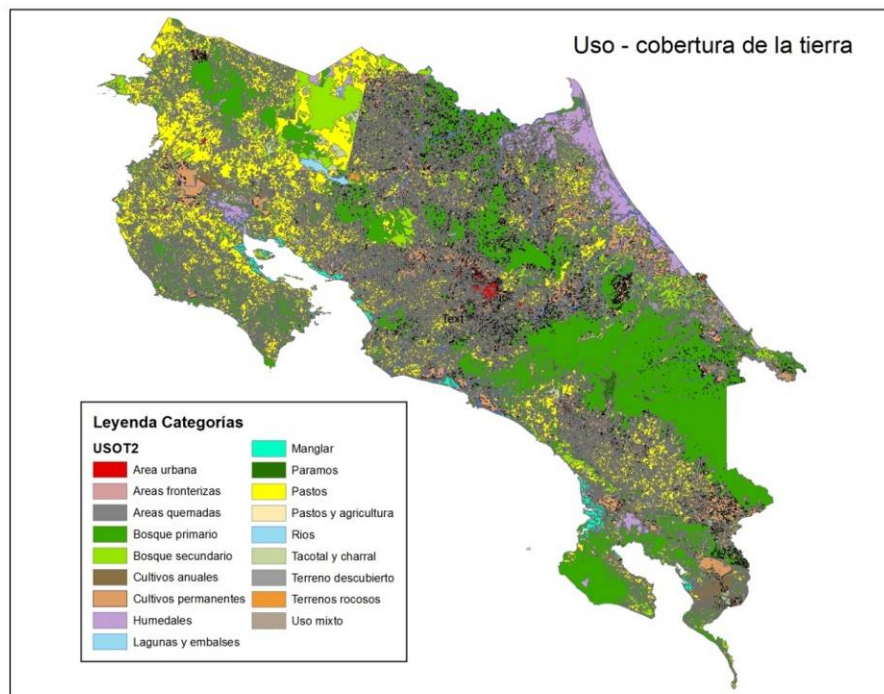
Cuadro # 15. Valores del factor KFc

Código	Textura	KFc
A	Arcilla, arcilla limosa o arcilla arenosa	0.10
C	Arena-grava	0.40
CL	Arcilla	0.10
L	Limoso medio	0.20
LS	Limo arenoso	0.30
S	Arenoso	0.40
SC	Arena-gravoso	0.40
SCL	Arenoso limoso	0.30
SIC	Limo-gravoso	0.30
SICL	Limoso arcilloso	0.20
SIL	Limoso	0.15
SL	Arenoso limoso medio	0.20

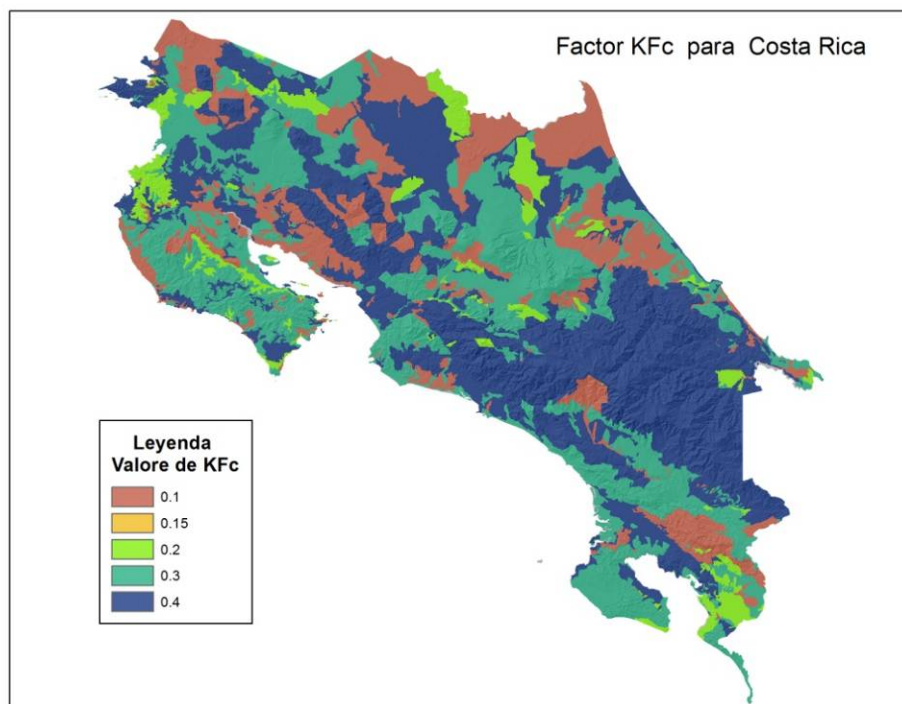
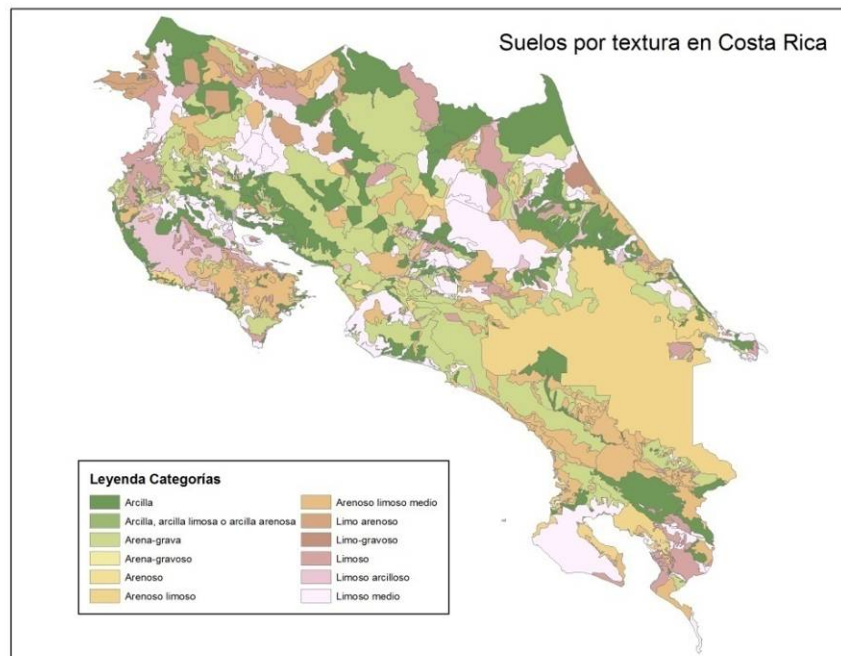
Factor Kp en función del modelo de elevación digital de 30 metros para Costa Rica



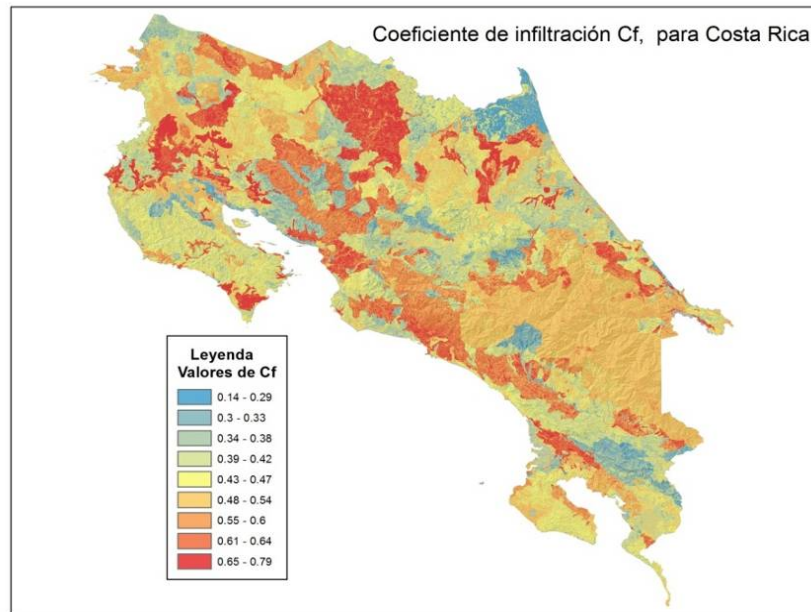
Factor Kv en función de la cobertura de la tierra para Costa Rica, tomando como base la cobertura-uso de la tierra del INBIO, 2005, modificada para que no salgan nubes o sombras.



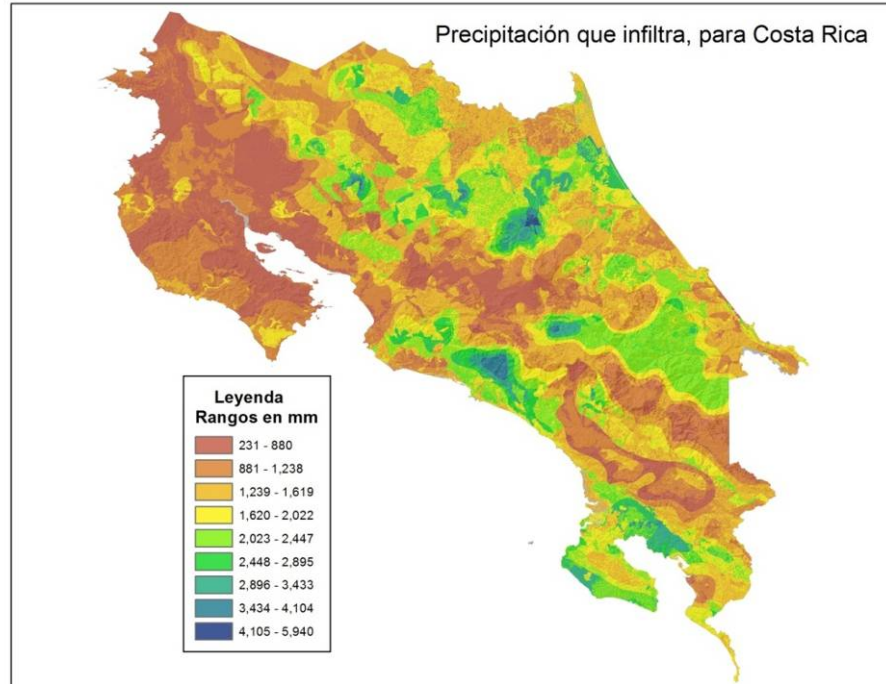
Factor KFc en función del mapa de suelos de A. Vásquez 1990, dado que contiene una clasificación por texturas de Costa Rica



Finalmente se obtiene el factor de infiltración para Costa Rica, dado por: $F_c = 0.88 C$, donde $C = K_p + K_v + K_{fc}$



Mapa de precipitación que infiltra, para Costa Rica, dado por $P_i = PPT * F_c$



5.3 Guatemala

Procedimiento

Determinación del coeficiente de infiltración (Cf)

El coeficiente de infiltración se calcula por la formula $Cf = 0,88 C$

Donde $C = Kp + Kv + Kfc$

Kp está en función de las pendientes, según el cuadro 11.

Kv está en función de la cobertura vegetal, en el Cuadro # 16 se incluyen los valores que se utilizaron, en este caso se utilizó un mapa del uso de la tierra, escala 1:250,000 y en algunas partes corregido a 1:50,000.

Cuadro # 16. Factor Kv para Guatemala

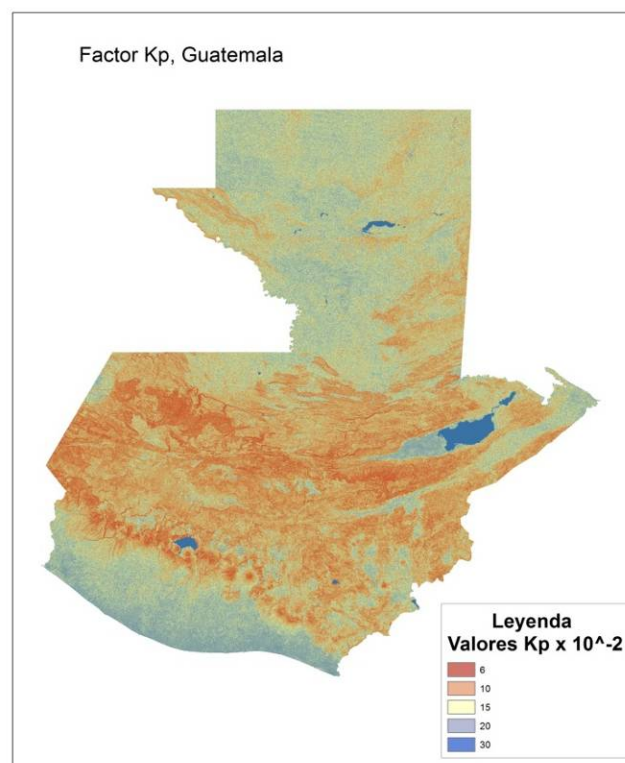
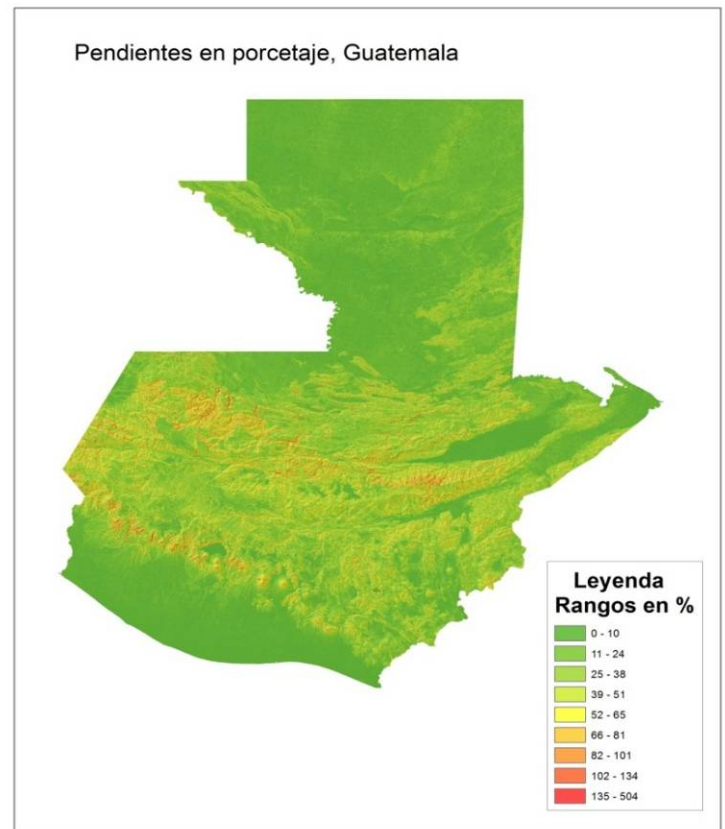
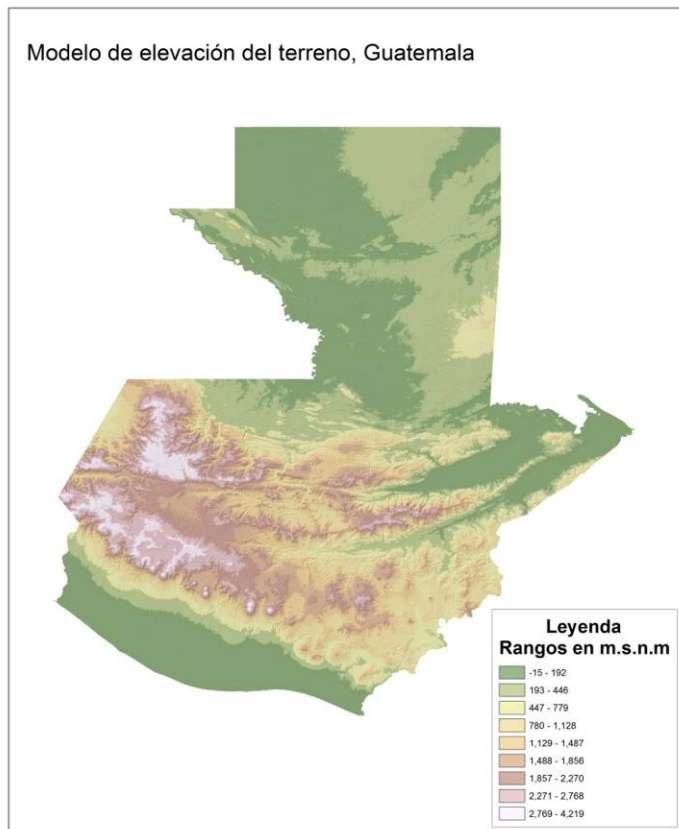
GRUPO	SUBGRUPO	KV100	KV
Agricultura	Agricultura limpia anual	10	0.10
Agricultura	Agricultura Perenne	10	0.10
Agricultura	Horticultura y Ornamentales (Incluye Viveros)	10	0.10
Agricultura	Pastos Cultivados	10	0.10
Areas urbanas y / o Construidas	Areas Construidas	5	0.05
Areas urbanas y / o Construidas	Industria (Comprende industria grande y peque±a)	5	0.05
Areas urbanas y / o Construidas	Otras construcciones (Ej. Construcciones dispersas y / o aldeas o comunidades)	5	0.05
Areas urbanas y / o Construidas	Servicios (Cementerios, Hospitales, Bases militares, Parques otros)	5	0.05
Areas urbanas y / o Construidas	Transporte (Aeropuertos, puertos, otros)	5	0.05
Bosque natural (Selva)		20	0.20
Bosque natural (Selva)	Conóferas	20	0.20
Bosque natural (Selva)	Latifoliadas	20	0.20
Bosque natural (Selva)	Mixto	20	0.20
Cuerpos de Agua	Lagos, Lagunas y otros (Lénticos)	0	0.00
Cuerpos de Agua	Reservorios (Incluye presas para generación de electricidad y para riego)	0	0.00
Pastos naturales	Arbustos con altura de 1.5 a 5m. (Incluye bosque secundario y regeneración)	17	0.17
Pastos naturales	Hierbazal	17	0.17
Pastos naturales	Matorrales (Guamil) con altura de 0.5 a 1.5	17	0.17
Tierras Aridas y / o Estériles	Areas de extracción de material (Canteras, Minas descubiertas)	10	0.10
Tierras Aridas y / o Estériles	Arena y / o playa	10	0.10
Tierras Aridas y / o Estériles	Coladas de ceniza y / o arena volcánica (Incluye otros materiales piroclásticos)	10	0.10
Tierras Aridas y / o Estériles	Rocas Expuestas incluye áreas erosionadas	5	0.05
Tierras H-medas y / o inundables	Humedal con bosque (Incluye bosque de Mangle)	1	0.01
Tierras H-medas y / o inundables	H-medal con pastos y / o otra vegetación	1	0.01

Kfc está en función de los suelos, dado que se usa el mapa de Simmons, aumentada la base de datos por Tobías H, 2001, a escala 1:250,000 y parcial a 1:50,000. La reclasificación final se hace acorde a las texturas, con el Cuadro # 17.

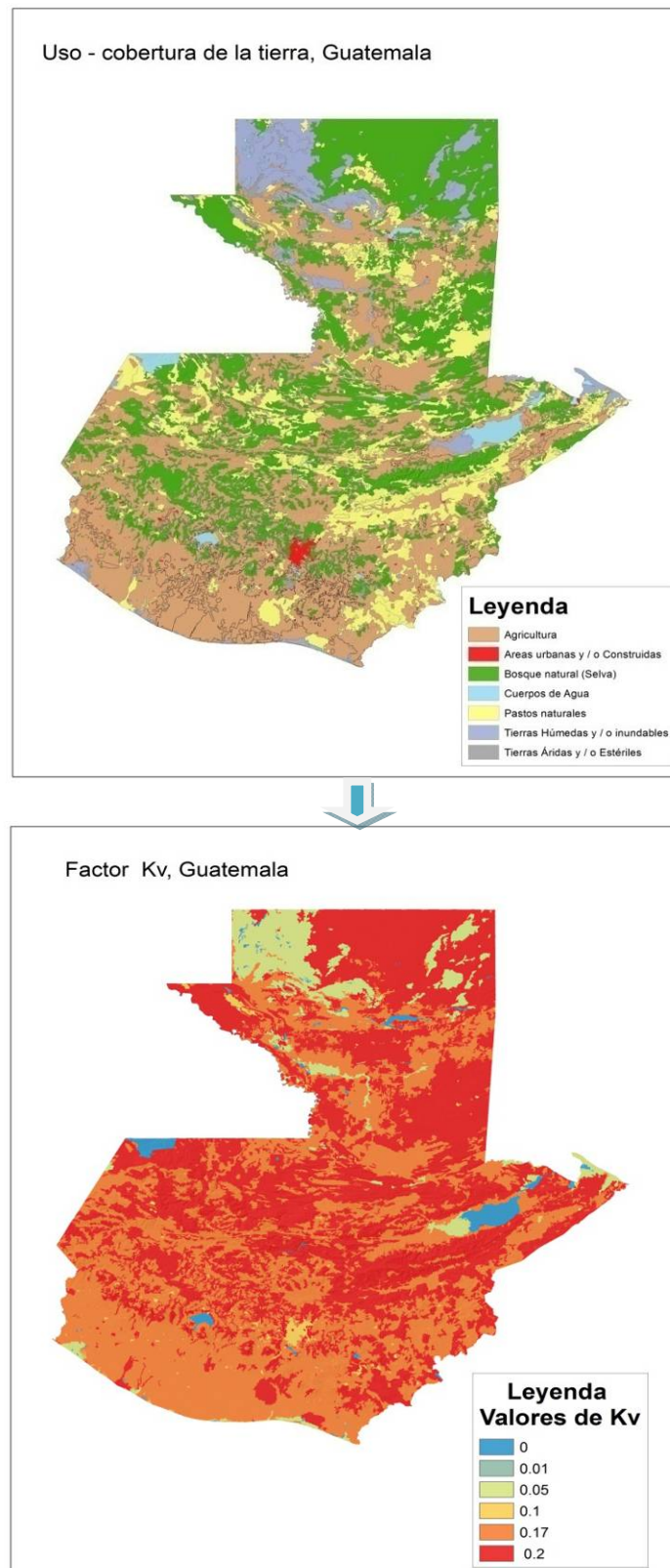
Cuadro # 17. Valores del factor KFc

TEXTURA	KFc $\times 100^2$	KFc
AGUA	0	0.00
Arcilla	10	0.10
Arcilla-Limosa	10	0.10
Arcilla-Limosa a Arcilla	10	0.10
Arcilla-Limosa a Arcilla Pastosa	10	0.10
Arcilla o Arcilla-Limosa	10	0.10
Arcilla o Franco-Arcillosa	10	0.10
Arena	40	0.40
Arena-Franca Gruesa o Franco-Arenosa a Arena-Gravosa	40	0.40
Arena-Franca o Arena Suelta	40	0.40
Arena Fina-Franca Suelta o Arena Muy Fina -Franca	40	0.40
Franca	20	0.20
Franca a Franca-Arcillosa	10	0.10
Franca a Franco-Arcillo-Arenosa	20	0.20
Franca a Franco-Arcillosa	10	0.10
Franca a Franco-Limosa	10	0.10
Franca o Franca-Arcillosa	10	0.10
Franco-Arcillo-arenosa	20	0.20
Franco-Arcillo-Arenosa	20	0.20
Franco-Arcillo-Arenosa Fina a Franco-Limosa	20	0.20
Franco-Arcillo-Esquistosa o Gravosa	15	0.15
Franco-Arcillo-Limosa	10	0.10
Franco-Arcillo-Turbosa	10	0.10
Franco-Arcillosa	10	0.10
Franco-Arcillosa a Arcilla	10	0.10
Franco-Arcillosa a Franco-Arcillo-Mic β cea	10	0.10
Franco-Arcillosa o Franca	10	0.10
Franco-Arcillosa o Franco-Arcillo-Limosa	10	0.10
Franco-Arenosa	40	0.40
Franco-Arenosa-Gravosa a Franco-Arcillo-Arenosa	40	0.40
Franco-Arenosa a Franca	40	0.40
Franco-Arenosa Fina	40	0.40
Franco-Arenosa Fina a Franco-Arcillosa o Franco-Arcillo-Limosa	40	0.40
Franco-Arenosa Muy Fina	40	0.40
Franco-Arenosa o Franco-Arenosa Fina	40	0.40
Franco-Arenosa o Gravosa	40	0.40
Franco-Gravosa	20	0.20
Franco-Limosa	15	0.15
Franco-Limosa a Franca Arcillosa	10	0.10
Franco-Limosa a Franco-Arcillosa	10	0.10
Franco-Limosa a Franco-Arenosa Fina o Muy Fina	20	0.20
Franco-Limosa o Arcilla-Limosa	10	0.10
Franco-Limosa o Arcillosa	10	0.10
Franco-Turbosa	15	0.15

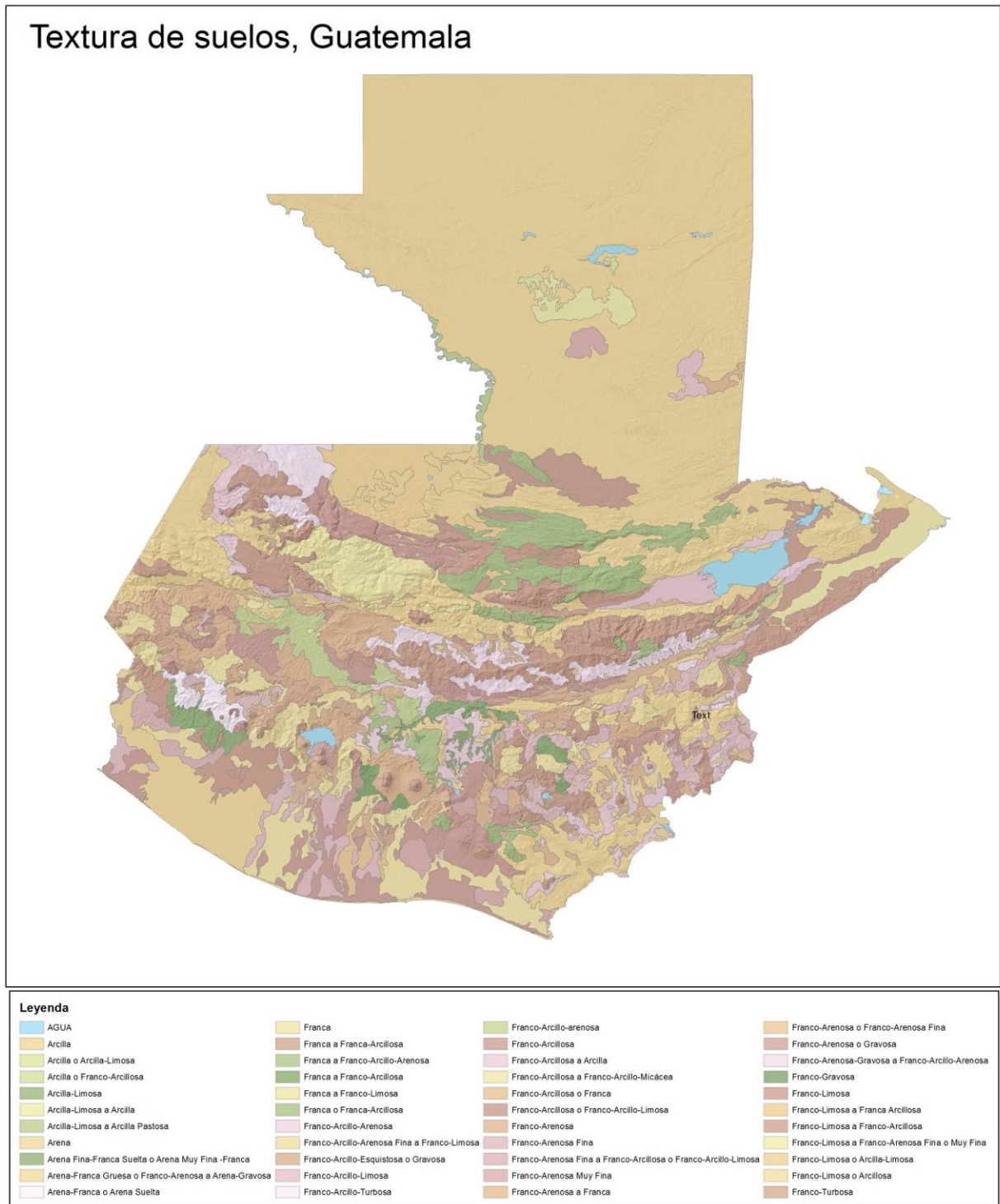
Factor Kp en función del modelo de elevación digital de 30 metros de Guatemala



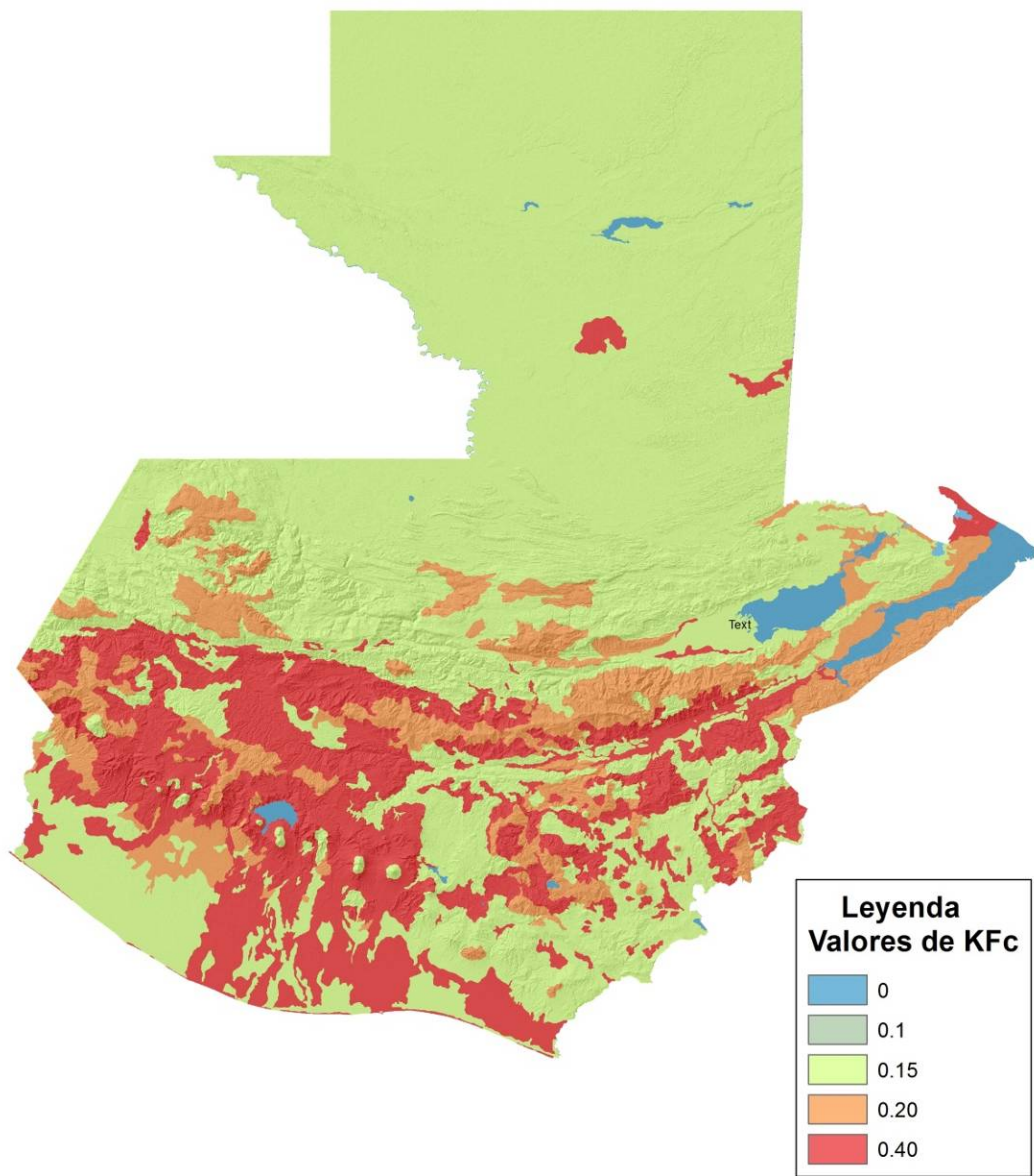
Factor Kv en función del uso-cobertura de la tierra para Guatemala



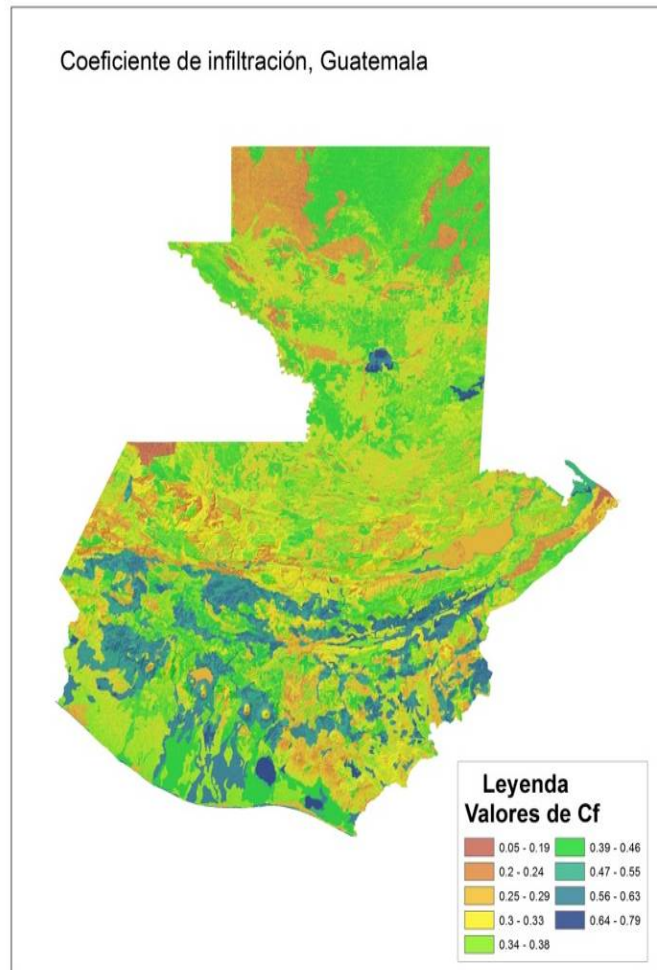
Factor KFc en función del mapa de series de suelos de Simmons, modificado por Tobías H, 2001 de Guatemala



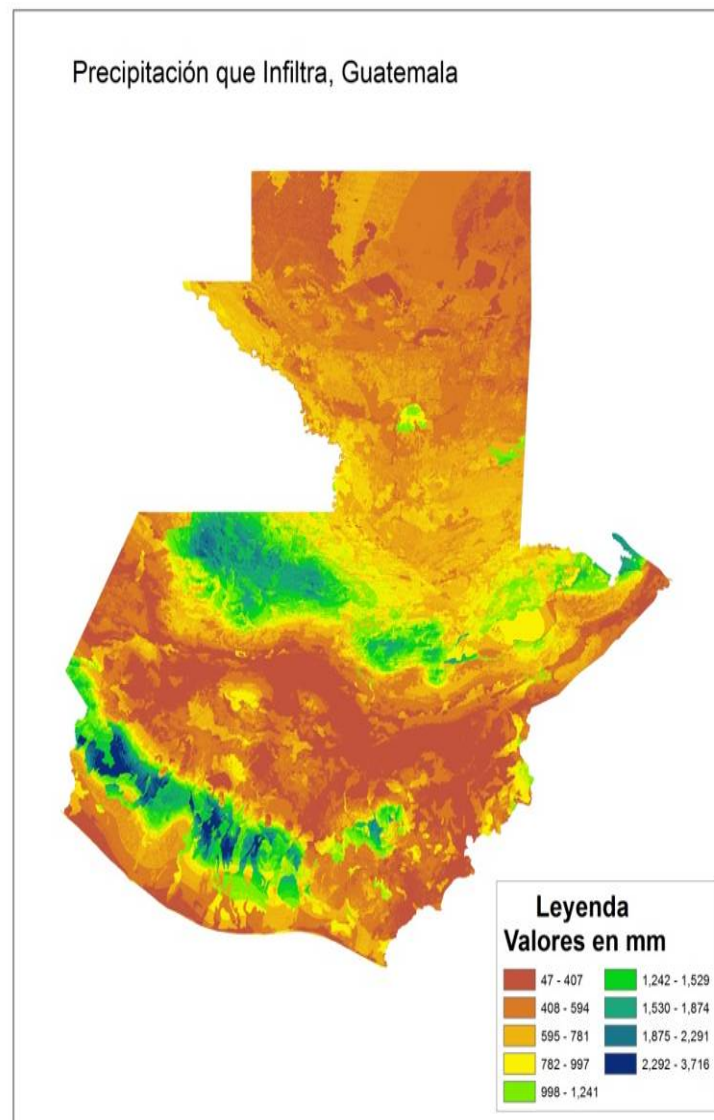
Factor Kfc, Guatemala



Finalmente se obtiene el coeficiente de infiltración para Guatemala, dado por factor $F_c = 0.88 C$, donde $C = K_p + K_v + K_{FC}$



Mapa de precipitación que infiltra



5.4 El Salvador

Procedimiento

Determinación del coeficiente de infiltración (Cf)

El coeficiente de infiltración se calcula por la formula $Cf = 0,88 C$

Donde $C = Kp + Kv + Kfc$

Kp está en función de las pendientes, según el cuadro 11.

Kv está en función de la cobertura vegetal, en el Cuadro # 18 se incluyen los valores que se utilizaron.

Cuadro # 18. Factor Kv para El Salvador

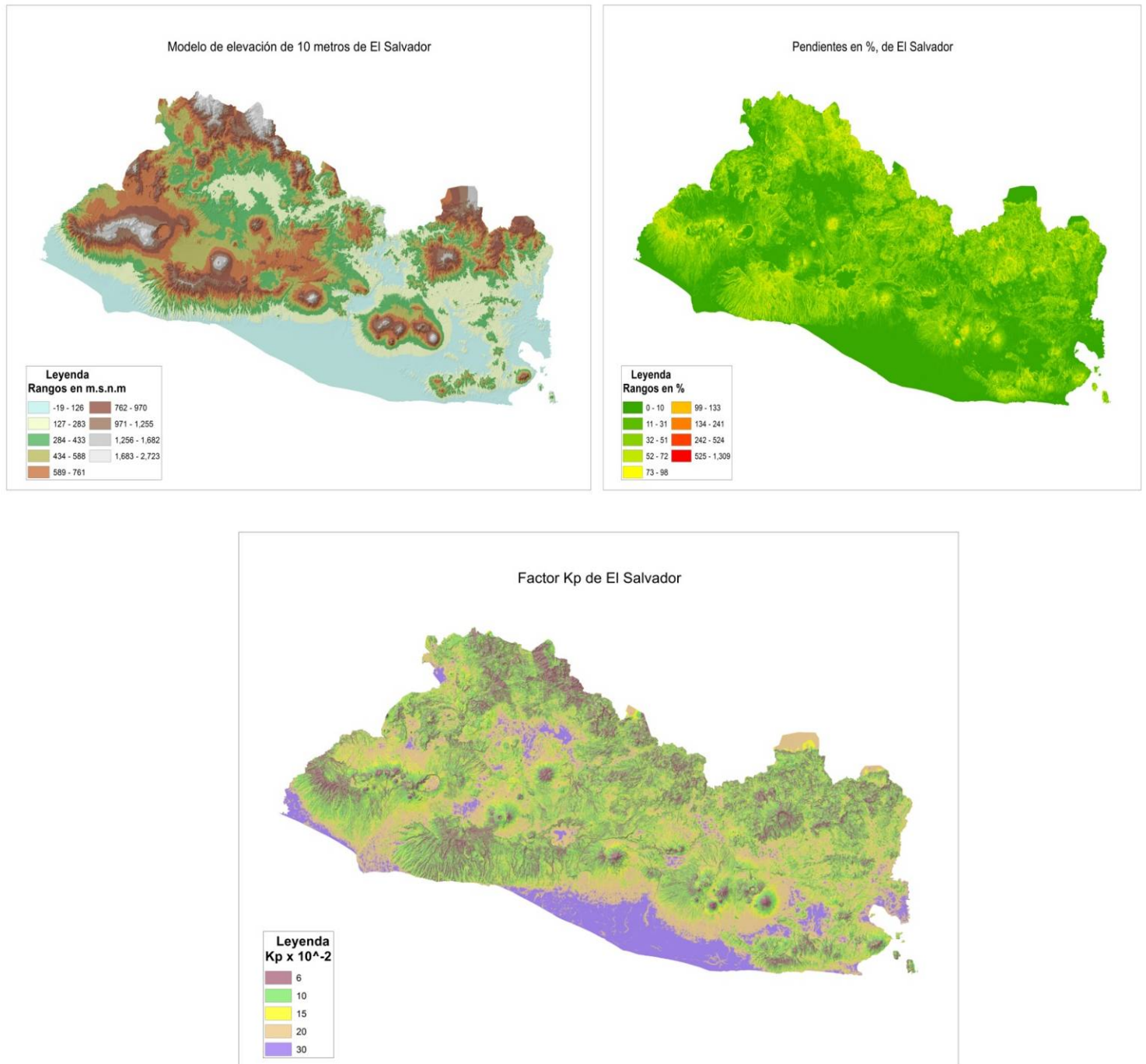
Uso - cobertura del suelo	KV
Areas Urbanas	0.05
Bosques	0.20
Cuerpos de Agua	0.00
Cultivos Anuales	0.10
Cultivos Mixtos	0.10
Cultivos Permanentes	0.10
Humedales	0.01
Manglares	0.01
Minería	0.15
Pastos	0.10
Vegetación Arbustiva	0.15
Zonas Industriales	0.05
Zonas Verdes Artificiales	0.15

Kfc está en función de los suelos, dado que se usa el mapa de Simmons, la reclasificación final se hace acorde a las texturas, con el Cuadro # 19.

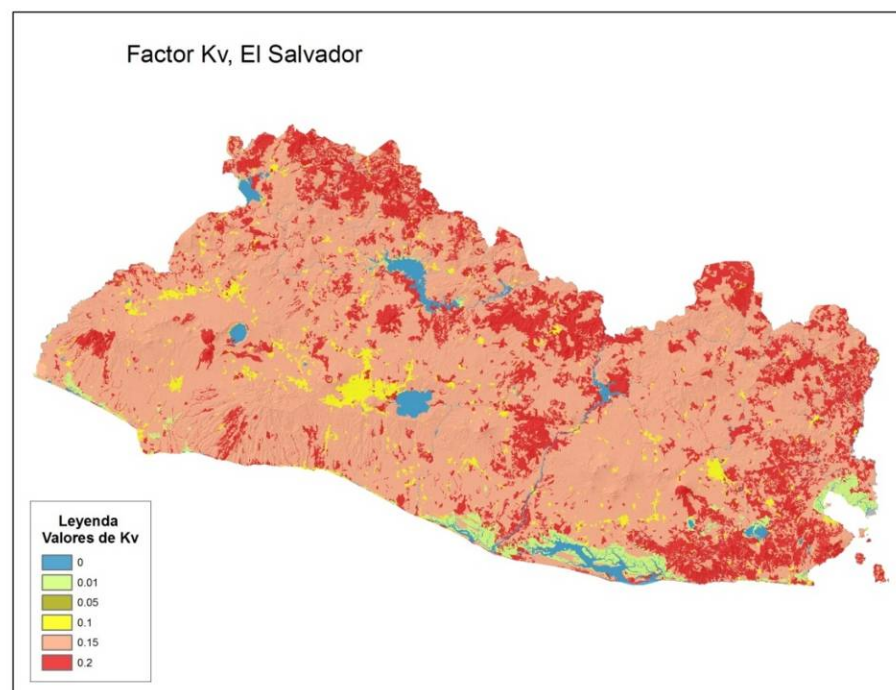
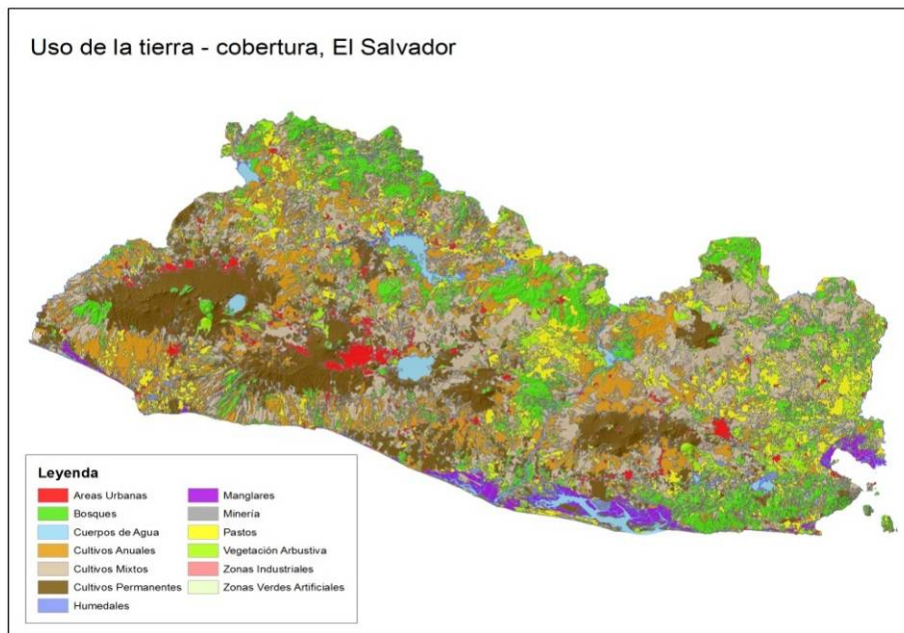
Cuadro # 19. Valores del factor KFc para El Salvador

SUELOS	DESCRIPCION	KFC
ALUVIALES	Son suelos de origen fluvial, poco evolucionados aunque profundos. Son suelos que tienen mala filtración y oscuro	0.1
ANDISOLES	Suelo desarrollado en depósitos volcánicos (como ceniza volcánica, piedra pómez, carbonillas y lava) y/o en materiales piroclásticos. Con textura franco arenosa	0.4
GRUMOSOLES	Suelos muy arcillosos de color gris a negro, cuando están muy mojados son muy pegajosos y muy plásticos	0.1
LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS	Se caracteriza por la descomposición completa de la roca, acumulación de óxidos de hierro y aluminio, humus escaso y la máxima filtración de los materiales solubles hasta los estratos inferiores. Son de tipo arcilloso	0.1
LATOSOLES ARCILLOSOS ACIDOS	Se caracteriza por la descomposición completa de la roca, acumulación de óxidos de hierro y aluminio, humus escaso y la máxima filtración de los materiales solubles hasta los estratos inferiores. Son de tipo arcilloso	0.1
LITOSOLES	Se considera un tipo de suelo que aparece en escarpas y afloramientos rocosos, su espesor es menor a 10 cm y sostiene una vegetación baja, se conoce también como leptosoles que viene del griego leptos que significa delgado	0.4
REGOSOLES Y HALOMORFICOS	Los Regosoles se desarrollan sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Los <i>suelos halomórficos</i> se refieren a los <i>suelos</i> salinos; pueden ser también sódicos o salino-sódico	0.2

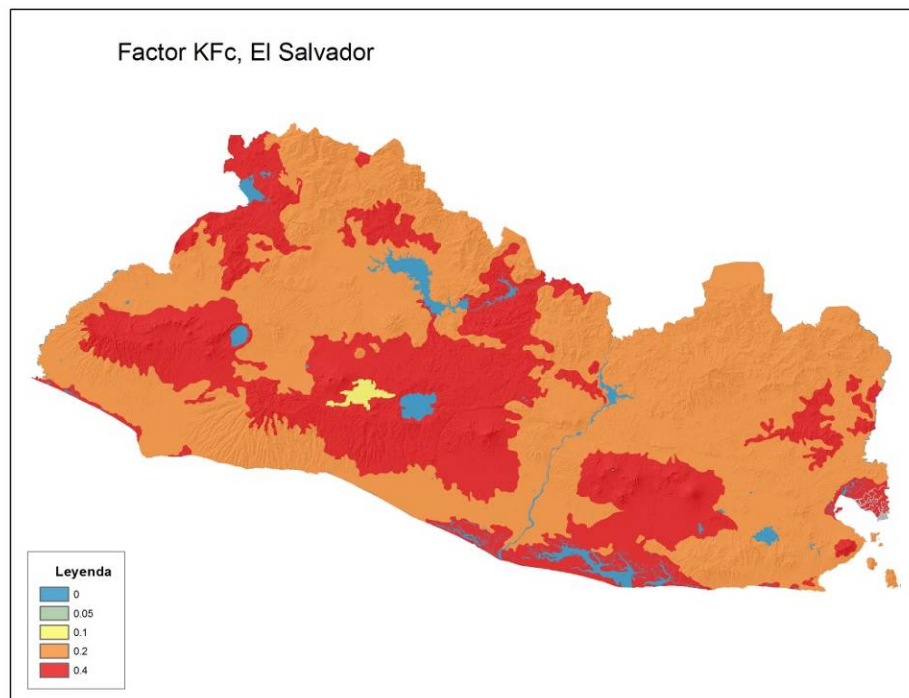
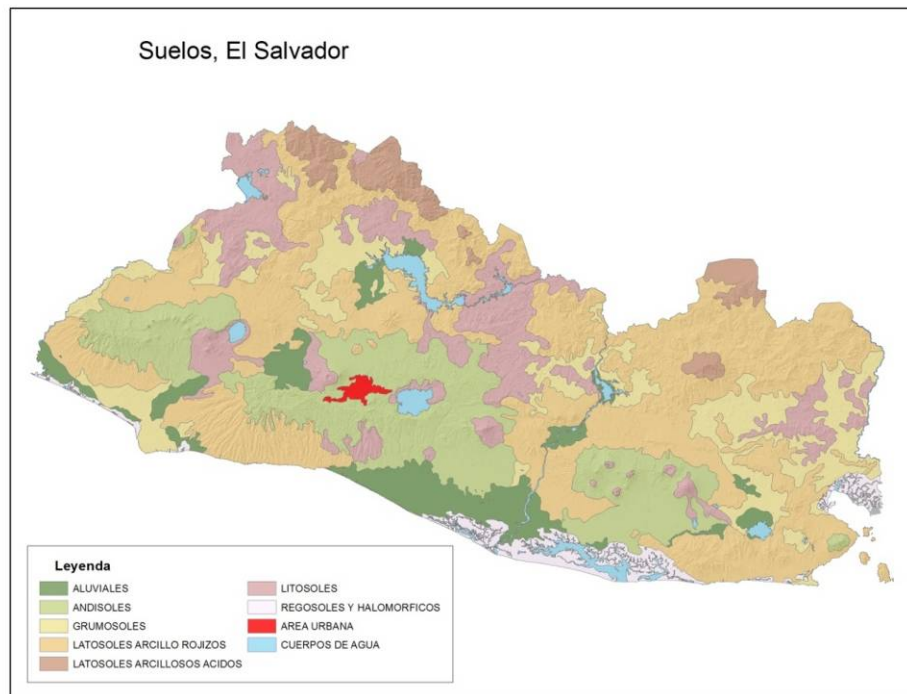
Factor Kp en función del modelo de elevación digital (de 10 metros), para El Salvador



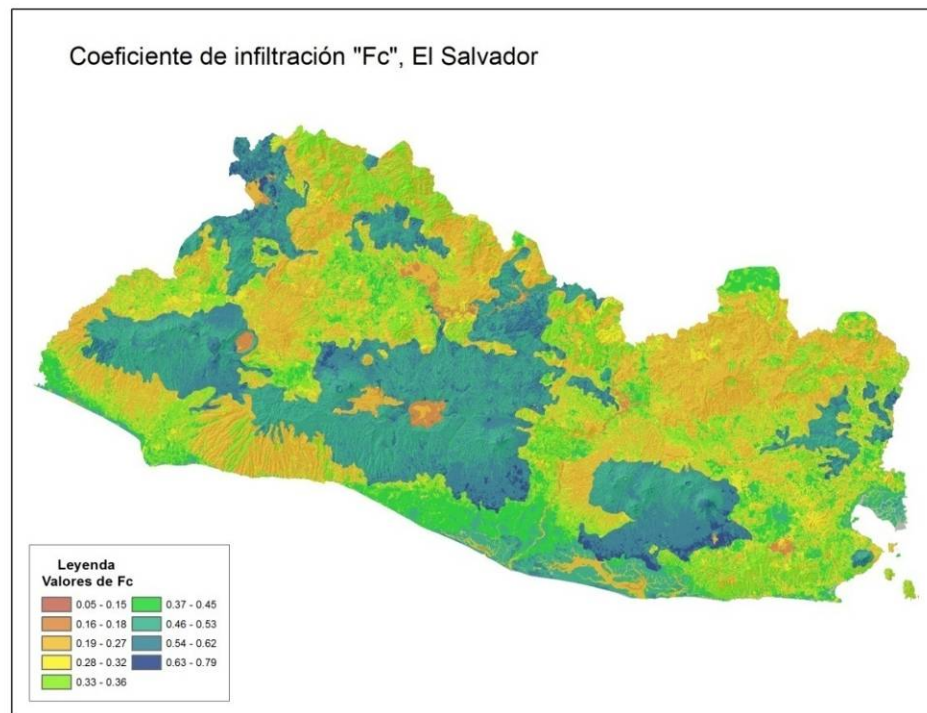
Factor Kv en función del uso-cobertura de la tierra para El Salvador



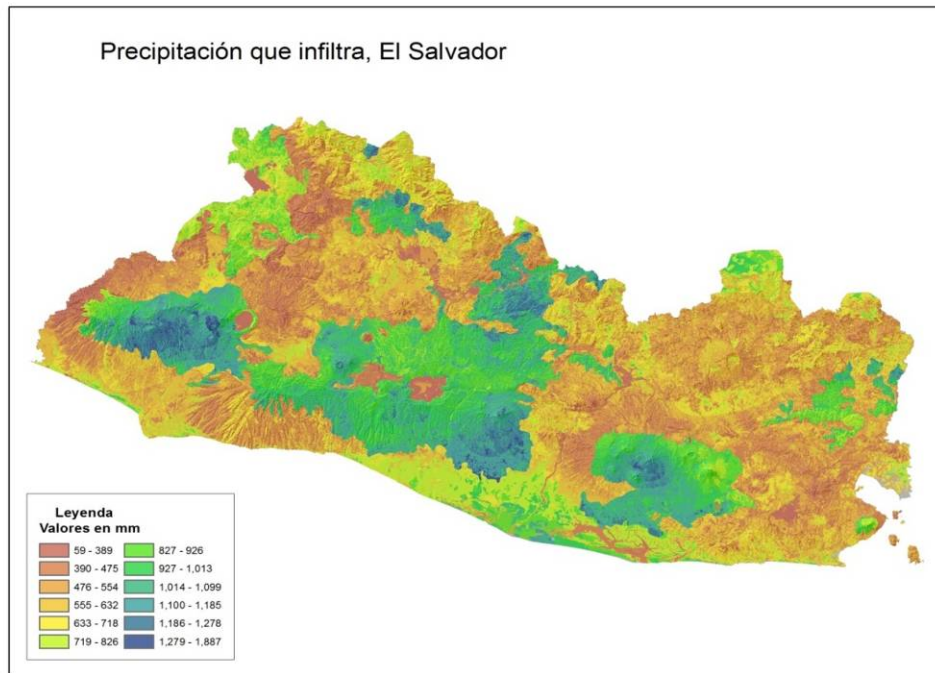
Factor KFc en función del mapa de suelos de El Salvador.



Finalmente se obtiene el coeficiente de infiltración para El Salvador, dado por factor $F_c = 0.88$
 C , donde $C = K_p + K_v + KFC$



Mapa de precipitación que infiltra



5.5 Nicaragua

Procedimiento

Determinación del coeficiente de infiltración (Cf)

El coeficiente de infiltración se calcula por la formula $Cf = 0,88 C$

Donde $C = Kp + Kv + Kfc$

Kp está en función de las pendientes, según el Cuadro 11.

Kv está en función de la cobertura vegetal, en el Cuadro # 20 se incluyen los valores que se utilizaron.

Cuadro # 20. Factor Kv para Nicaragua

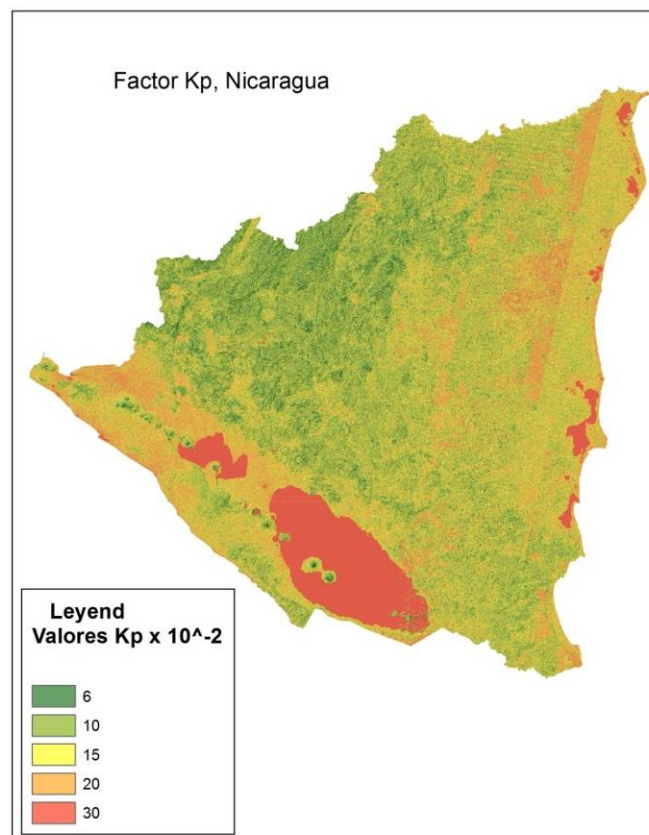
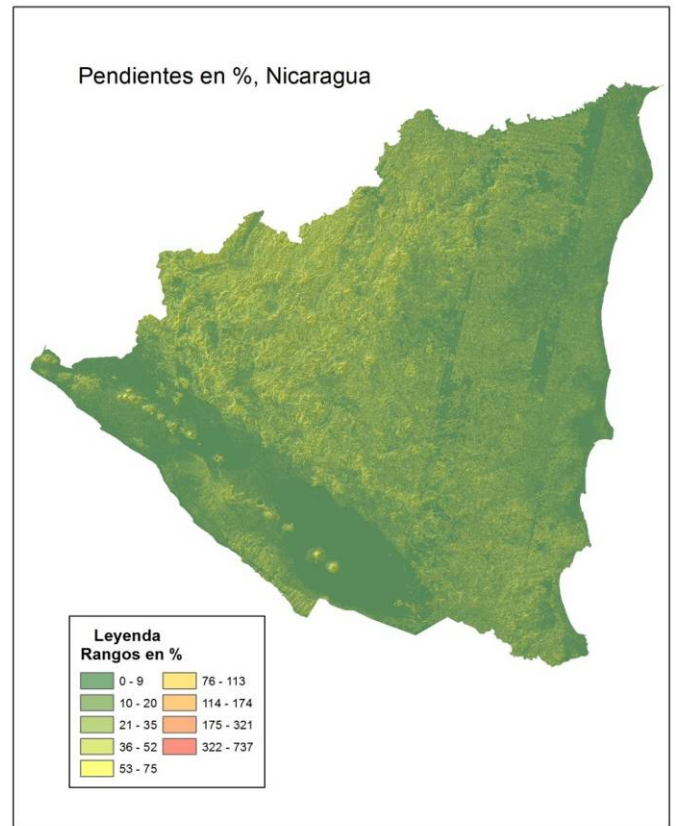
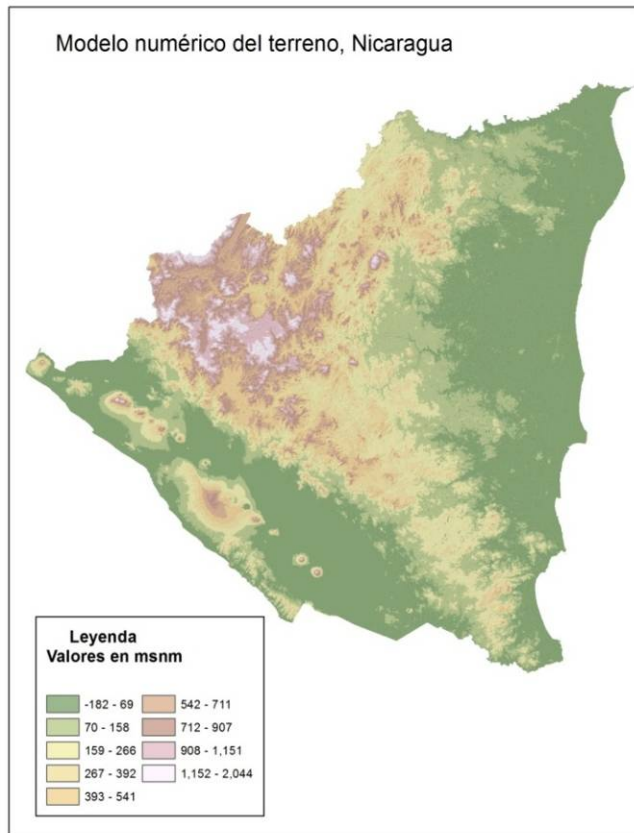
Uso o cobertura de la tierra	KV
Agua	0.00
Area urbana	0.05
Bosque	0.20
Bosque conifereas	0.20
Cultivos anuales	0.10
Cultivos permanentes	0.10
Humedales	0.01
Pastos	0.17
Tacotal y pasto	0.16
Terrenos descubiertos	0.10

Kfc está en función de los suelos, dado que se usa un mapa taxonómico incompleto, se necesitó utilizar otra mapa de SOTERLAC a escala 1 : 1,5000000 para completar el faltante, la reclasificación final se hace acorde a las texturas, con el Cuadro # 21.

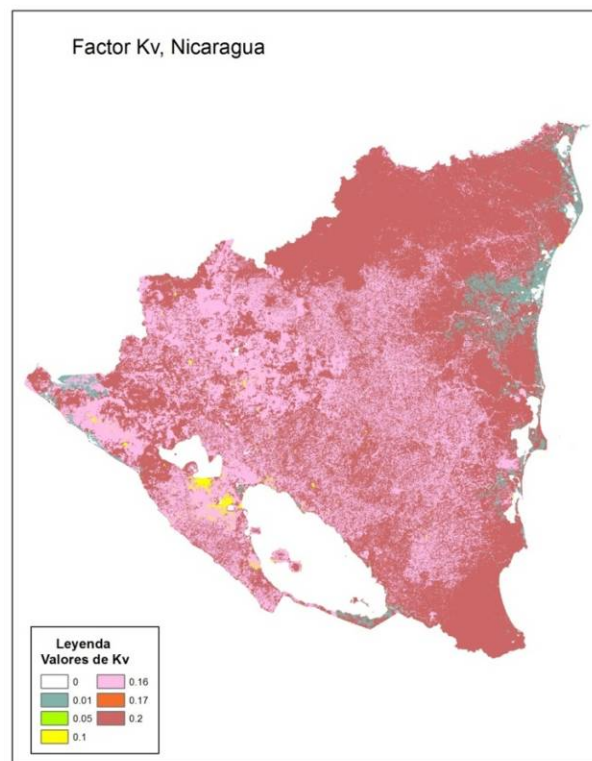
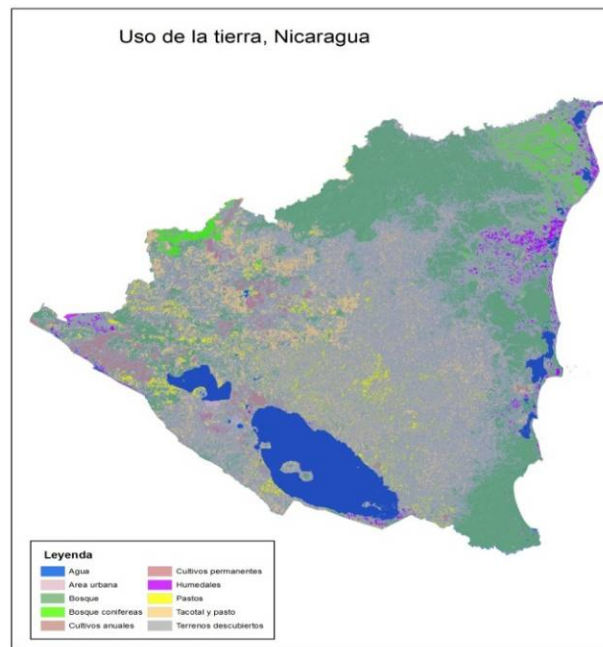
Cuadro # 21. Valores del factor KFc

ORDEN	FKC
Agua	0.00
Alfisol	0.10
Entisol	0.20
Histosol	0.10
Inceptisol	0.10
Molisol	0.10
Oxisol	0.10
Ultisol	0.40
Vertisol	0.10
I= Imperfectamente drenado	0.10
M= Moderadamente bien drenado	0.20
S= Algo más que excesivamente drenado	0.40
V= Muy pobremente drenado	0.10
W= Bien drenado	0.20

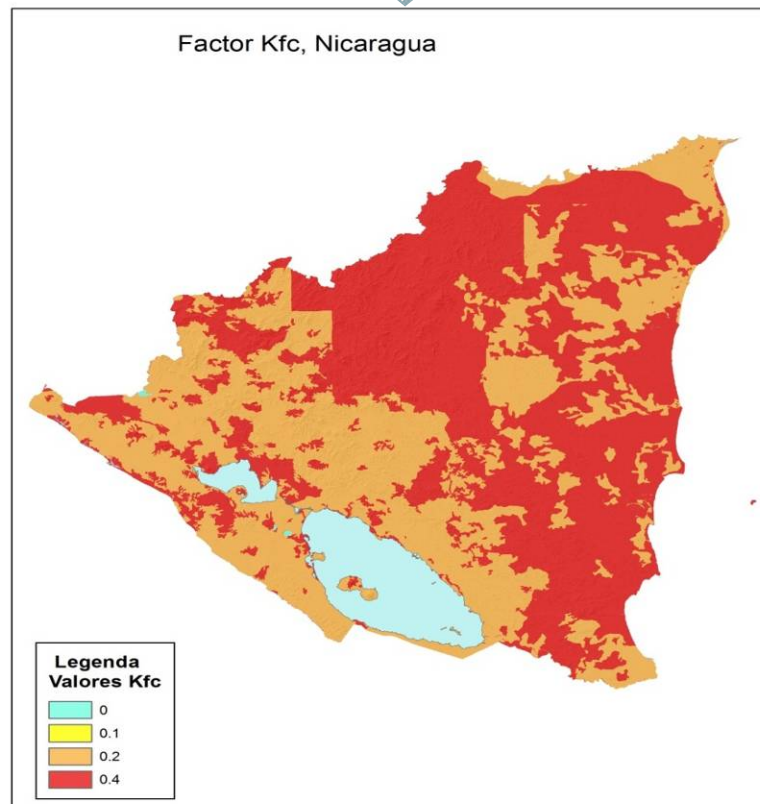
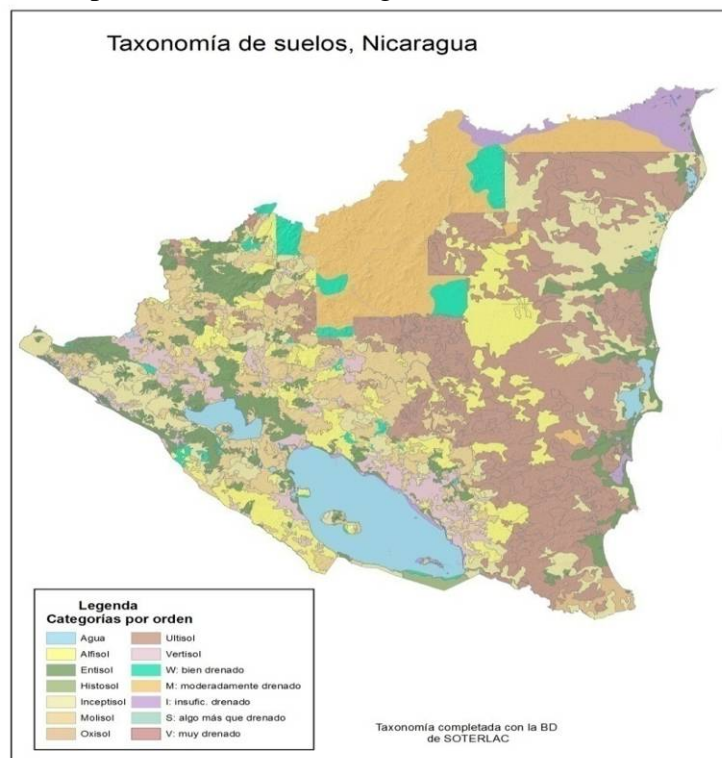
Factor Kp en función del modelo de elevación digital, Aster 30 metros



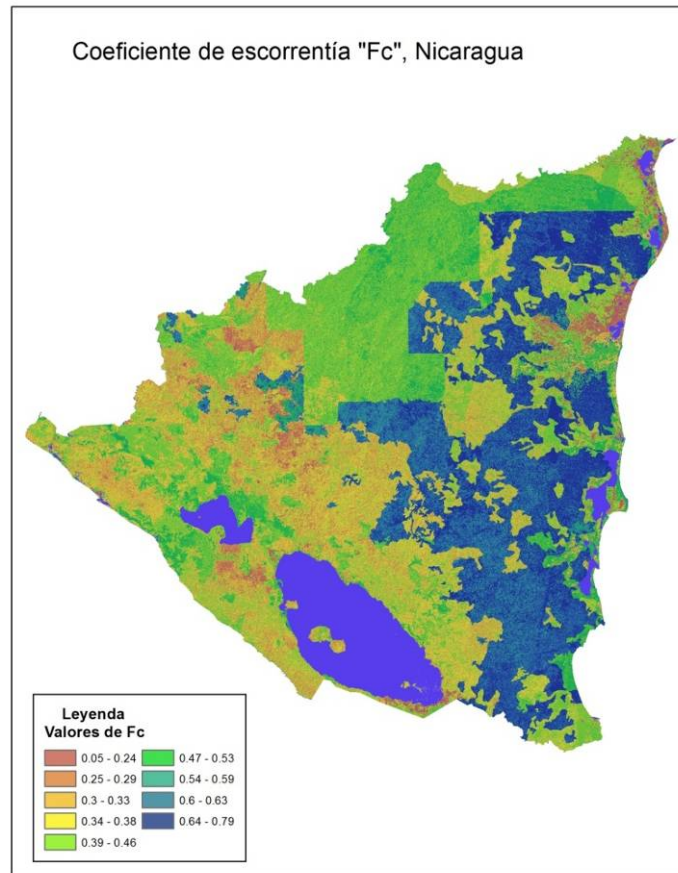
Factor Kv en función del uso- cobertura de la tierra para Nicaragua



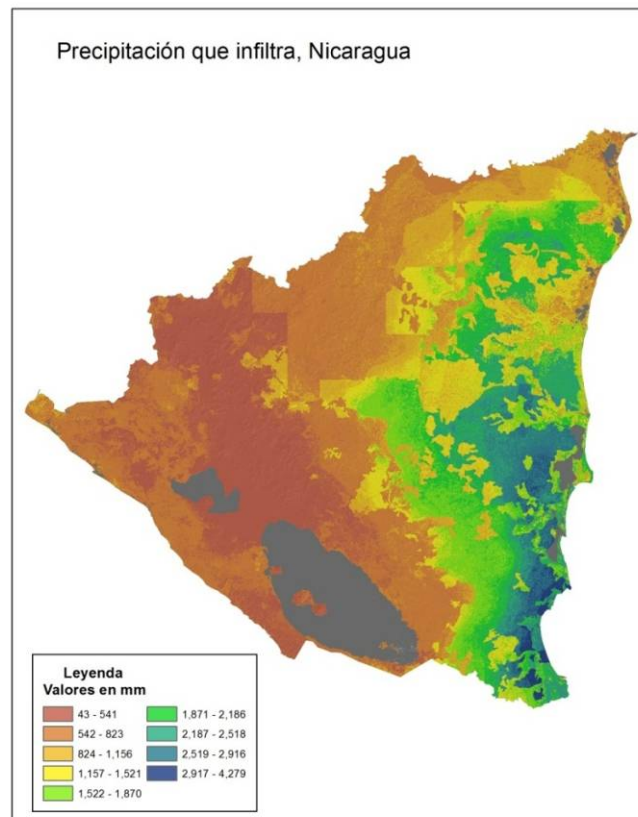
Factor KFc en función del mapa de suelos de Nicaragua



Finalmente se obtiene el factor $F_c = 0.88 C$, donde $C = K_p + K_v + K_{FC}$



Mapa de precipitación que infiltra



6. Importancia del mapa de precipitación que infiltra

El mapa final resultante permite al usuario conocer cuál es la precipitación promedio que infiltra para el área que está estudiando, para esto basta utilizar el mapa “grid” de precipitación de infiltra y obtener el promedio para el polígono que considera estudiar.

De esta forma el producto final permite conocer los sitios de precipitación que infiltra, que se pueden relacionar con el tipo de cobertura presente en el área, en particular con cobertura forestal, puede servir para tomar la decisión de proteger éstas áreas para el futuro, así como sitios importantes para su recuperación, desde la perspectiva del agua subterránea y de recarga hídrica, en apoyo a la disponibilidad del agua para consumo y para la agricultura de secano, aunque esto pareciera redundante dado que factor Kv relacionado al uso-cobertura de la tierra ya toma en cuenta la cobertura forestal del área.

Otra forma de presentar el mapa para su uso es por unidades de suelo, esto fue propuesto por FORGAES, 2005, y pareciera que es una forma interesante de visualizar los resultados, solo que esto da la precipitación promedio que infiltra por cada unidad de suelo, sin embargo, hay que hacer una corrección a) si el área bajo estudio es más pequeña o más grande que la respectiva unidad, se debe ajustar el valor por una razón de áreas, y b) si el área comprende varias unidades de suelos, en este caso aparte de la corrección de razón por áreas hay que acumular los valores de las unidades.

7. Validación del modelo

Como se indicó el modelo del BHS solo se ha validado a nivel mensual y haciendo mediciones en campo, tanto a nivel de los autores originales (Losilla&Schosinky, 2000), como de trabajos en áreas de recarga hídrica incluyendo trabajo de campo en diferentes partes de Costa Rica, AyA, 2013.

A escala nacional o regional se trata de una aproximación, dado que no se cuenta con balances hídricos mensuales en la región, y hay deficiencias de datos en cuanto al conocimiento de los suelos y del uso-cobertura de la tierra, aparte que no hay mapas de acuíferos a escalas de apropiadas, ni de niveles freáticos ni otros parámetros hidrogeológicos.

Los mapas presentados acá pueden mejorarse a) mediante talleres en los países que permitan retroalimentar la información recabada, b) pasando a la realización del modelo en forma mensual, vía programación PHYTON-ARCGIS, que implicaría trabajar de cerca con los institutos meteorológicos de la región, para obtener balance climáticos espaciales confiables; esto último constituiría un importante aporte en una II fase del proyecto.

8. Talleres y aporte de especialistas

Durante este proceso se realizaron tres talleres a) inicio de la consultoría en El Salvador, b) Taller en Costa Rica mostrando avances en la metodología de recarga hídrica y adquisición de datos, promocionado por CATIE, UICN, CRS y, c) taller de suelos promocionado por CRS y CIAT.

Además de esto se contó con especialistas en hidrogeología: Geol. Fernando Samayoa por UICN, e Hidrogeo. Marcelino Losilla por CATIE, quienes dieron un aporte significativo a la metodología.

9. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo incluyen las relacionadas: a) metodología, b) aplicación

Metodología

- Apoyado tanto en la revisión de metodologías, como en talleres y revisiones con uno de los autores iniciales de la metodología el Señor M. Losilla, 2013, se concluye que el balance hídrico de suelos debe aplicarse a nivel mensual, considerando las propiedades de los suelos asociados a la Capacidad de Campo y el punto de Marchitez. Los cuadros No 5 y No 6, son indicativos de cómo debiera aplicarse la metodología.
- Las aproximaciones realizadas en forma regional o nacional, son aproximaciones que se realizan a sobre mapas anuales de lluvia y/o evapotranspiración, y constituyen una aproximación. Aquí se enmarcan varias aplicaciones realizadas por SENARA, 2004 o IMM, 2010. Incluyendo la de FORGAES, 2005.

Aplicación

- Se logra obtener un Índice Potencial de Infiltración (IPI) para cada país en forma individual. La aproximación depende del tipo de datos propios de cada país, por lo que los resultados varían acorde a la información de entrada. El caso de Panamá se ha dejado por fuera, sin embargo, de requerirse se puede hacer una aproximación con el mapa de suelos de SOTERLAC, escala 1:1,500,000.
- Las bases de datos para la modelación, salvo en Guatemala y El Salvador, no están depuradas para ser utilizadas, por que los mapas originales fueron editados, utilizando información auxiliar, por ejemplo es imperativo que cada polígono de cobertura-uso de la tierra posea su definición, el usar clase como nubes o sombras no sirve en el análisis, esto se extiende a las series de suelos.
- No hay unificación-homogenización de las clasificaciones de la información tanto del uso-cobertura de la tierra como de las series de suelo. Esto obliga a dar un tratamiento individual de la metodología por país.
- La modelación se hace en forma anual, aunque lo ideal es hacerla en forma mensual, por cuanto de la forma anual no se tiene en cuenta la condición de humedad antecedente.
- El aplicar el balance hídrico de entradas menos pérdidas, tipo FORGAES, solo se debiera hacerse en forma mensual, de otra forma puede resultar en una condición muy fuerte que excluye áreas que pueden estar sujetas a recarga hídrica.
- Lo realizado es una aproximación de la precipitación potencial que infiltra, por lo que cada zona a ser analizada con esta información debe considerarse con su potencial climático propio de la zona, esto es, no se deben excluir zonas por un bajo Índice Potencial de Infiltración.
- Se ha dotado a la región de un mapa aproximado de Índice Potencial de Infiltración que, que permita valorar las zonas de protección de este recurso sobre todo en las áreas que mantiene cobertura forestal.

10. Recomendaciones

- La información base debe mejorarse, los mapas existente a nivel regional de uso-cobertura de la tierra no están en condiciones de usarse a nivel regional. Los mismos están desactualizados y utilizan diferentes clasificaciones.
- La información de suelos, se ha descuidado y se vive de lo realizado por SIMMONS, en la década 50-60, en Guatemala, Honduras, El Salvador, a escalas 1:250,000 y 1:200,000; el caso de Nicaragua está incompleto, en Costa Rica los esfuerzos se quedaron a 1:200,000. Para Panamá no fue posible conseguir un mapa de suelos a escala apropiada. Por esta razón se deben seguir los esfuerzos que realiza Guatemala en esta temática y contar con un mapa de suelos a nivel de América Central a escala 1:50,000 o 1:25,000.
- Se recomienda la aplicación del modelo en forma mensual, siguiendo la hoja electrónica que se presenta en este informe, pero aplicada a través del SIG, esto lo puede hacer CATIE en el corto plazo, propiciando un balance hídrico Centroamericano.

10. Bibliografía

- Georgia Environmental Protection Division, 1996. Introducción a cuencas Hidrológicas.
- Custodio E. y Llamas R., 1999. Agua subterránea, *Afers Internacionales*, núm. 45-46, pp. 35-57. Fundación CIDOB.
- Losilla M y Schosinsky G, 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Centroamericana de Geología*.
- Losilla M, 2013. Evaluación y zonificación hidrogeológica del cantón de Garabito, en edición final.
- Matus O, Faustino J, Jiménez F., 2010 Guía para la determinación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. CATIE.
- RAS, 2005. Modificación al método Losilla&Schosinsky (2000), aplicado en El Salvador por FORGAES.
- IMN, 2010. Diagnóstico del recurso hídrico de Costa Rica.
- SENARA, 2004. Aplicación del índice de recarga hídrica y método GOD para el cantón de Poas, Heredia.
- Schosinsky G, 2006. Cálculo de la Recarga Potencial de Acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.