



Evaluación hidrológica y recomendaciones de manejo de agua para la Alianza Cacao en El Salvador

Hydrological Assessment and Water Management Recommendations for the Cacao Alliance in El Salvador

Jefferson Valencia, Fredy Monserrate, Mayesse da Silva, Marcela Quintero

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)

Cali, Colombia

Agosto, 2017

Tabla de Contenido

Lista de Tablas.....	2
Lista de Figuras.....	3
Lista de Ilustraciones.....	4
1. Introducción.....	5
2. Objetivos.....	6
3. Fuentes de Información.....	7
4. Priorización y Descripción de Áreas de Estudio.....	9
5. Mapeo Digital de Suelos.....	12
6. Determinación del Balance Hídrico.....	17
6.1 Estimación de la escorrentía superficial.....	19
6.2 Estimación de las variables del balance hídrico a nivel mensual para las zonas de estudio.....	21
7. Identificación de Momentos Críticos para Asegurar Disponibilidad Hídrica para el Cacao.....	22
7.1 Ecofisiología del cultivo del cacao y sus relaciones hídricas.....	23
8. Generación de Unidades de Paisaje.....	26
9. Prácticas para Aumentar la Disponibilidad Hídrica en Momentos Críticos del Cultivo de Cacao.....	30
9.1 Análisis de cosecha de agua lluvia.....	30
9.2 Recomendaciones de manejo de suelo.....	32
10. Conclusiones.....	36
11. Referencias Bibliográficas.....	38



Lista de Tablas

Tabla 1. Fuentes de información seleccionada inicialmente.....	7
Tabla 2. Números de curva (CN2) de las zonas de estudio de acuerdo a cada cobertura vegetal y grupo hidrológico	19

Lista de Figuras

Figura 1. Localización general de las áreas de estudio	11
Figura 2. Perfiles de suelos y mapas de órdenes de suelos a escala 1:900 mil (Cuenca Banderas) y 1:50mil (Cuencas Lempa).....	13
Figura 3. Formas del paisaje agrupadas.	14
Figura 4. Unidades de suelo-paisaje.....	14
Figura 5. Mapas de arcilla, capacidad de campo (CC), y punto de marchitez permanente (PMP).	15
Figura 6. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (WHC).....	16
Figura 7. Esquema de balance hídrico de Thornthwaite and Matther usado para la evaluación hidrológica mensual.....	18
Figura 8. Estimación de la escorrentía superficial a nivel mensual entre los años 2000 y 2014.....	21
Figura 9. Momentos críticos para asegurar disponibilidad hídrica en el cultivo del cacao.....	22
Figura 10. Contenido diferencial de humedad del suelo (mm) para mantenimiento de estado vegetativo	24
Figura 11. Contenido diferencial de humedad del suelo (mm) para adecuado rendimiento	25
Figura 12. Capas utilizadas para la generación de unidades de paisaje.....	27
Figura 13. Herramienta de visualización de datos agroclimáticos	27
Figura 14. Gráfico de las variables agroclimáticas para una unidad de paisaje determinada	28
Figura 15. Gráfico de humedad del suelo para una unidad de paisaje determinada.....	29
Figura 16. Gráfico de diferencial de humedad del suelo para una unidad de paisaje determinada.....	29
Figura 17. Esquema metodológico para identificar sitios potenciales para cosecha de agua	31
Figura 18. Sitios potenciales de cosecha de agua.....	31

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Primer visita de campo en Noviembre 2015.	9
Ilustración 2. Segunda visita de campo en Mayo 2016.	10
Ilustración 3. Siembra en contorno	33
Ilustración 4. Cobertura muerta (mulch) en sistemas de cacao en El Salvador.	33
Ilustración 5. Terraza individual	34
Ilustración 6. Acequia en nivel.....	35

1. Introducción

Catholic Relief Services (CRS) está liderando “El Salvador National Cacao Initiative” (referida como la Alianza Cacao), una iniciativa para promover el sector del cacao en El Salvador. Esta iniciativa está financiada por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), la Fundación Howard G Buffett, la Corporación del Desafío del Milenio (MCC) y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, incluyendo al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de El Salvador. CRS está implementando esta iniciativa en conjunto con varias ONG internacionales (entre ellas, el Centro Internacional para Agricultura Tropical - CIAT) y socios locales.

La meta de la Alianza Cacao es establecer 10,000 ha de cacao de alta calidad en el país entre 2014 y 2018, trabajando con al menos 6,000 pequeños agricultores. Para esto, se han identificado dos factores críticos que potencialmente limitan la producción de cacao: la degradación generalizada del suelo y los patrones variables de precipitación. La degradación de los suelos causada por la erosión de las pobres prácticas agrícolas y la deforestación limita severamente la producción agrícola en El Salvador. A su vez, la temporada seca de seis meses en El Salvador crea serias limitaciones, pero estos desafíos no son exclusivos de El Salvador y existen casos de ejemplo (Ecuador, Brasil y Ghana) donde el cacao puede ser cultivado exitosamente en ambientes semiáridos y con largas temporadas secas.

Basado en lo anterior, CRS subcontrató al CIAT para evaluar las condiciones hidrológicas en las zonas donde trabaja la Alianza Cacao y priorizar tres áreas para desarrollar recomendaciones de manejo de suelo y agua en cultivos de Cacao en El Salvador utilizando una combinación de herramientas de mapeo digital de suelos, modelación hidrológica y sistemas de información geográfica (SIG).

2. Objetivos

- Priorizar tres zonas para un estudio detallado basado en los criterios establecidos por el equipo de la Alianza Cacao y las recomendaciones del CIAT.
- Desarrollar un enfoque sistemático para analizar los requerimientos específicos del agua en cacao y las soluciones de manejo de ésta para cada zona de estudio.
- Definir soluciones prioritarias de manejo de suelo y agua para cada una de las zonas de estudio que incrementen su disponibilidad hídrica para el cacao en condiciones de secano e irrigación suplementaria.

3. Fuentes de Información

A partir de la información que fue suministrada por múltiples fuentes y teniendo en cuenta los requerimientos de la modelación llevada a cabo en este estudio, inicialmente se hizo una detallada y minuciosa búsqueda con el fin de extraer y encontrar información valiosa para las entradas de los modelos y establecer un primer panorama de las zonas de interés. En la siguiente tabla se presentan las fuentes de la información cartográfica seleccionada:

Tabla 1. Fuentes de información seleccionada inicialmente

Nombre	Formato	Descripción
Modelo Digital de Elevación (MDE)	Raster (*.img)	MDE con resolución espacial de 10m generado a partir de curvas de nivel. Fuente: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova” (CENTA).
Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra	Shapefile (*.shp)	Mapa con clasificación Corine Land Cover (CLC) generado en el 2010 a partir de imágenes satelitales RapidEye. Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador (MAG).
Precipitación	Raster (*.tif)	Rasters mensuales para el periodo 2000-2014 a 5Km de resolución espacial: Fuente: Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS).
	Shapefile (*.shp)	Estaciones climatológicas con registros históricos mensuales. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN).
Evapotranspiración Potencial	Raster (*.tiff)	Rasters mensuales para el periodo 2000-2014 a 1Km de resolución espacial. Fuente: MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)
Suelos	Shapefile (*.shp) y Tabla (*.dbf)	Mapa pedológico a escala 1:900,000 elaborado en 2012. Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG); Mapa de clases de suelos a escala 1:50,000 y perfiles de suelos a nivel nacional. Fuente: Centro Nacional de Tecnología

Nombre	Formato	Descripción
		Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova” (CENTA).
Cartografía Base	Shapefile (*.shp)	Drenajes, Centros poblados, División Político Administrativa, Cuencas, etc.†

† Suministrado por CRS

4. Priorización y Descripción de Áreas de Estudio

Con el fin de poder definir las áreas de estudio para este proyecto, se llevaron a cabo dos visitas de campo. La primer visita fue en Noviembre 2015 en la cual el grupo de trabajo de CIAT en conjunto con CRS y la Alianza Cacao visitaron sitios donde agricultores habían plantado Cacao en Noviembre 2014 (Ilustración 1). Aquellas áreas son principalmente planas y están localizadas en la parte baja del paisaje. Aunque el suministro de agua no parece ser un problema por sus localizaciones en el paisaje, dichas áreas se benefician de zonas aguas arriba las cuales presentan un fuerte déficit de agua durante el período seco (Diciembre-Abril).



Ilustración 1. Primer visita de campo en Noviembre 2015.

La segunda visita sucedió en Mayo 2016 y de nuevo el equipo de CIAT junto con CRS y la Alianza Cacao visitaron áreas de laderas donde agricultores estaban empezando a plantar Cacao (Ilustración 2). Estas áreas son bastante inclinadas y por lo tanto la pérdida del suelo y agua debido los procesos de erosión fueron los mayores problemas que se evidenciaron. Además, si identificó que algunos productores están

construyendo reservorios de agua para suministrar riego al cacao durante el periodo de sequía que si extiende de Noviembre a Abril. En el caso del productor de la Ilustración 2, el reservorio fue construido sin una planeación adecuada el cual debería considerar su abastecimiento por agua de lluvia. Como resultado, el productor tiene que comprar agua proveniente de fuentes externas a propiedad para llenar el reservorio y que es transportada a la finca por camiones. Eso genera un costo adicional al productor además de ser poco sostenible.



Ilustración 2. Segunda visita de campo en Mayo 2016.

Después de haber llevado a cabo las dos visitas de campo mencionadas anteriormente, junto con la Alianza Cacao se escogieron tres áreas para llevar a cabo el presente estudio (Figura 1. Localización general de las áreas de estudio). Los criterios utilizados para definir estas áreas fueron: (i) debían ser áreas donde la Alianza Cacao trabajara; (ii) áreas con fuertes pendientes; (iii) de fácil acceso; (iv) localizadas en el Occidente, Paracentral y Oriente de El Salvador; (v) húmedas, medio húmedas y secas; (vi) que se traslaparan con otros proyectos de CRS (ASA¹, Fantel, otros) y por supuesto se tuvo en cuenta el (vii) número de agricultores beneficiarios de la Alianza Cacao.

¹ Programa de Agricultura, Suelos y Agua

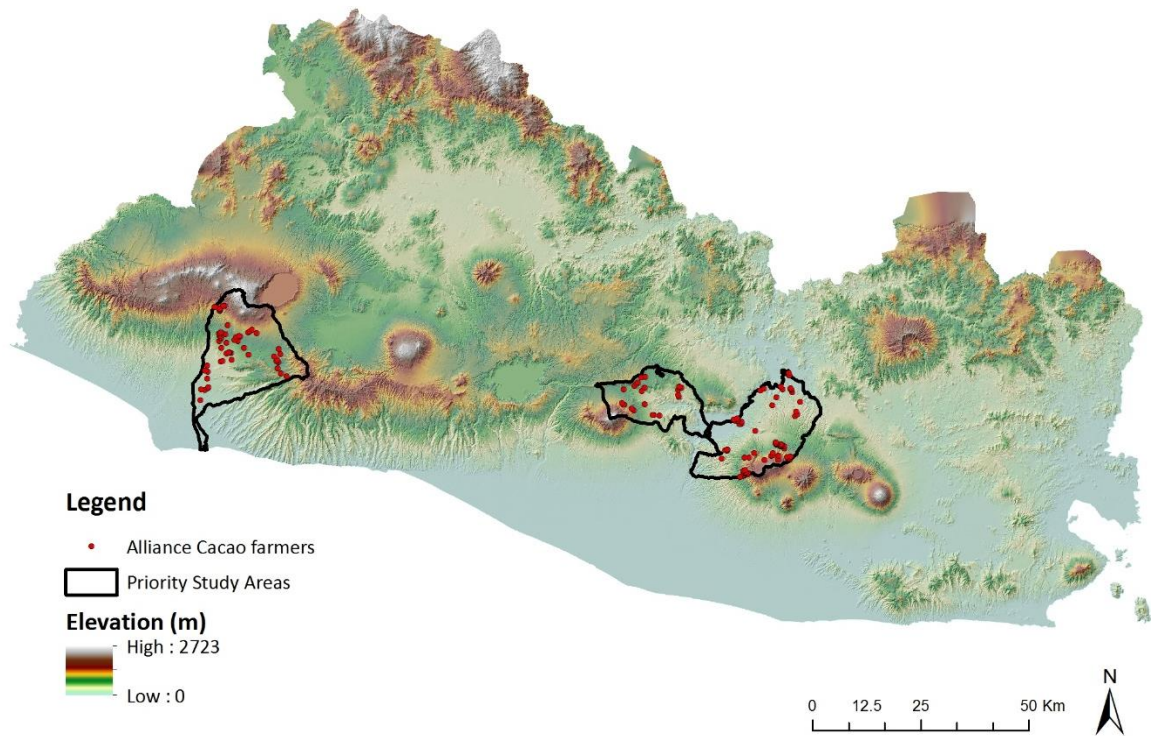


Figura 1. Localización general de las áreas de estudio

5. Mapeo Digital de Suelos

Los suelos varían a través de los paisajes y funcionan de manera diferente dependiendo de su proceso de formación. Sin embargo, la información de suelos normalmente ha sido presentada como mapas temáticos en formato de polígonos que se centran en las diferencias taxonómicas relacionadas con los sistemas de clasificación de suelos y, a pesar de que son útiles, no representan la variabilidad espacial de las propiedades y funciones del suelo dentro de una clase taxonómica (dentro del polígono) requeridas para una evaluación hidrológica a nivel de paisaje. Gracias al desarrollo de tecnologías, software y capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos, la variabilidad de las propiedades de suelos puede ser determinada a través de mapas continuos en formato *raster* (pixel a pixel) desarrollados según técnicas de Mapeo Digital de Suelos (MDS) (Zhu et al., 2001; McBratney et al., 2003; Ashtekar & Owens, 2013; Ashtekar et al., 2014; Da Silva et al., 2016).

El proceso de MDS implica la recopilación de datos y mapas existentes e información histórica combinados o no con nuevos datos de campo y modelos de elevación digital para determinar la variabilidad de los suelos según los factores de formación definidos por Jenny (1941) y cuantitativamente formalizados por McBratney et al. (2003). Los mapas digitales de suelos son muy flexibles y pueden ser analizados conjuntamente de muchas maneras diferentes, dependiendo del problema o interrogante que se quiera abordar (e.g. se pueden hacer cálculos matemáticos en SIG utilizando los mapas *raster*) además de ser de fácil actualización una vez nuevos datos estén disponibles.

Para este estudio, fueron generados mapas continuos de arcilla, punto de marchitamiento permanente (PMP), capacidad de campo (CC) y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (WHC) necesarios para la evaluación hidrológica a nivel de paisaje en las zonas priorizadas.

Datos utilizados: se utilizó información de suelos disponible de 54 perfiles de suelo y mapas de órdenes de suelos a escala 1:900 mil (Cuenca Banderas) y 1:50 mil (Cuencas Lempa) (Tabla 1, Figura 2) para desarrollar los mapas continuos de propiedades de suelo para las zonas del estudio. Sin embargo, los datos de los perfiles de suelo no tenían información de las características hídricas del suelo como CC y PMP necesarias para ese estudio. Para solucionar esa cuestión, se aplicó las ecuaciones de pedotransferencia desarrolladas por Saxton & Rawls (2006) para determinar CC y PMP a partir de datos de textura (arena y arcilla) y materia orgánica del suelo disponible para los 54 perfiles de suelos. Además de la información de suelos, también fue utilizado un modelo digital de elevación (MDE), con resolución espacial de 10 metros, suministrado por el CENTA.

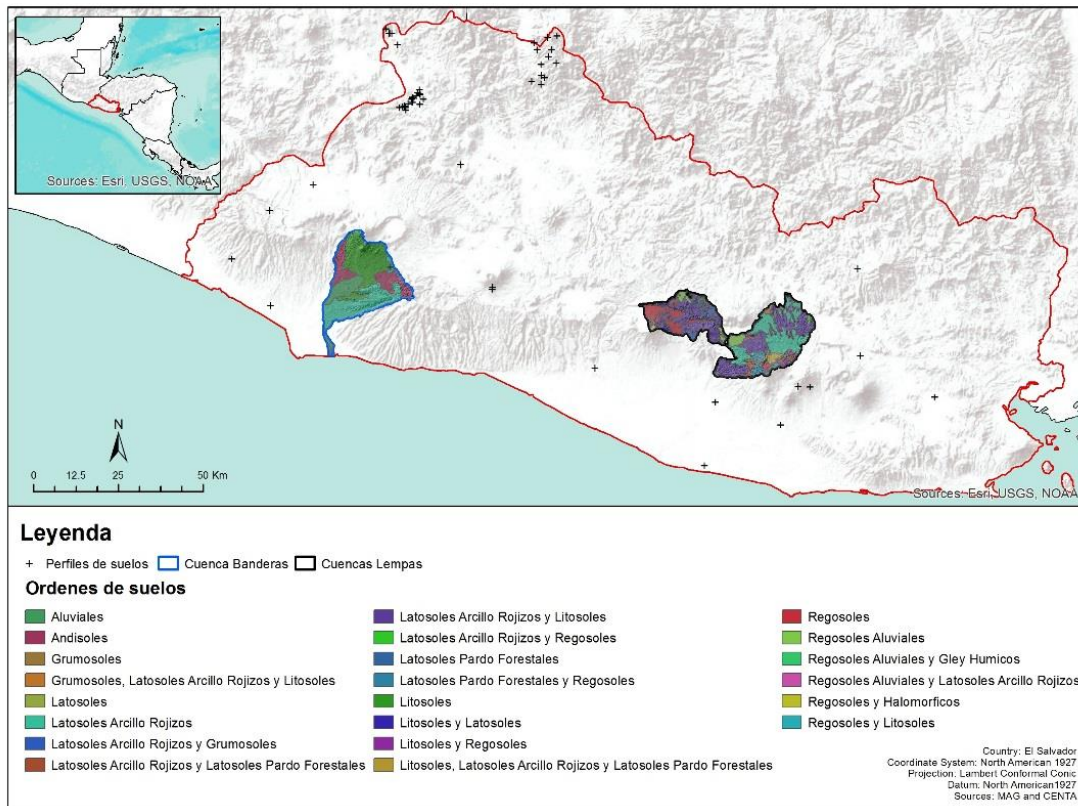


Figura 2. Perfiles de suelos y mapas de órdenes de suelos a escala 1:900 mil (Cuenca Banderas) y 1:50mil (Cuenca Lempa).

Mapeo de propiedades del suelo: los mapas continuos de arcilla, CC, y PMP fueron generados utilizando un modelo de MDS basado en las relaciones suelo-paisaje y conocimiento experto. Este modelo considera que el terreno es el principal factor en la diferenciación local de los suelos y formación de las propiedades del suelo (Ashtekar et al., 2014). Las formas del paisaje fueron generadas utilizando Geomorphons add-on en Grass-GIS, el cual divide el paisaje en 10 formas: *flat, peak, ridge, shoulder, spur, slope, pit, valley, foot slope, and hollow* (Jasiewicz & Stepinski, 2013). Las formas del paisaje generadas para las zonas del estudio fueron agrupadas resultando en 5 clases (Figura 3).

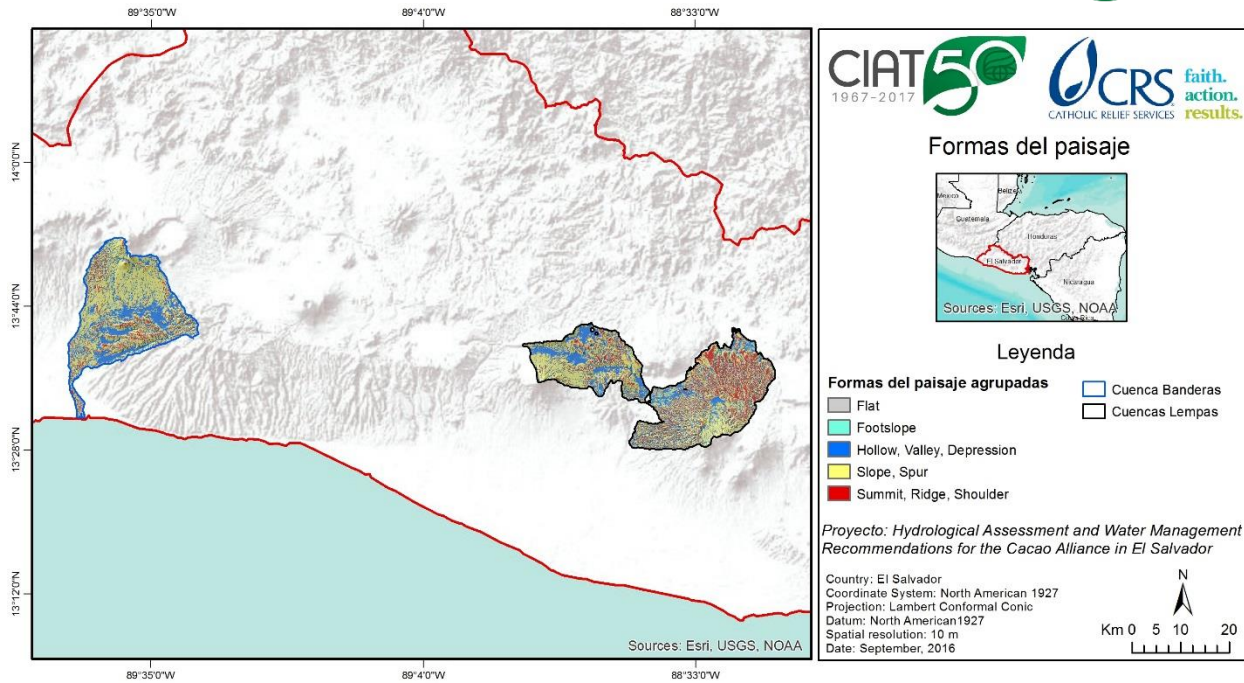


Figura 3. Formas del paisaje agrupadas.

Las formas agrupadas combinadas con los mapas de suelos resultaron en 13 unidades de suelo-paisaje utilizadas para construir mapas de similitud según lógicas difusas (Figura 4).

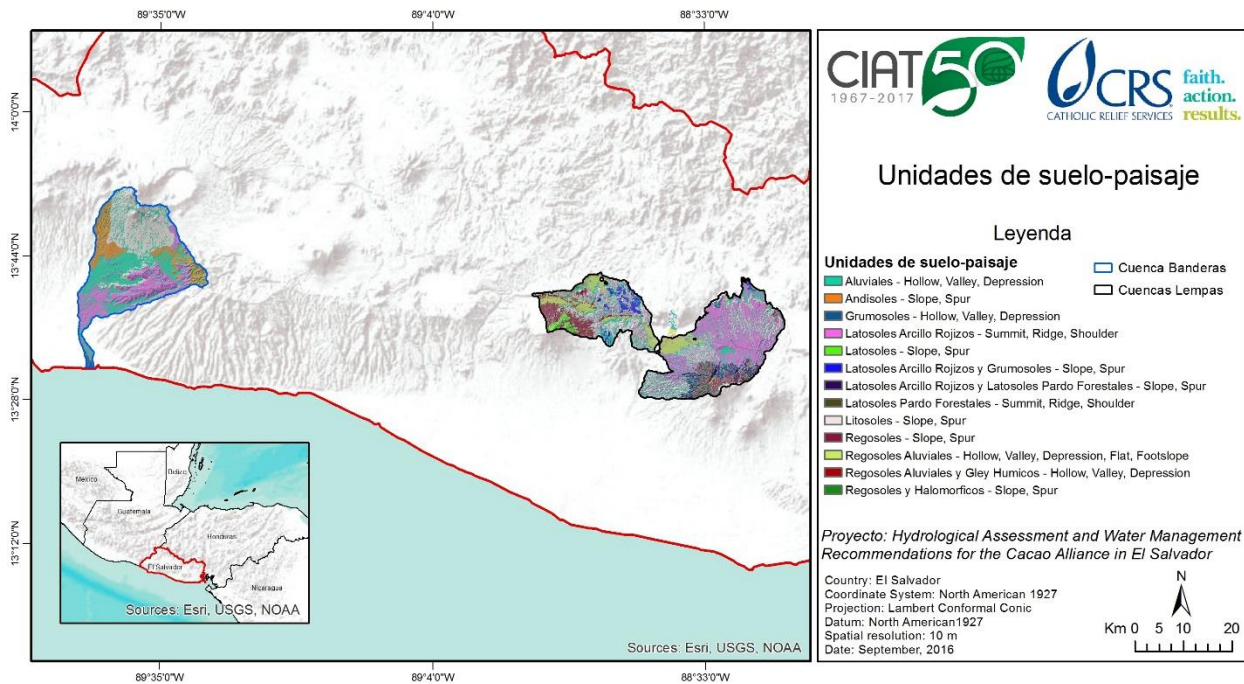


Figura 4. Unidades de suelo-paisaje.

Los mapas de similitud fueron generados usando el Soil Land Inference Model (SoLIM) (Zhu, 1997; Zhu et al., 1996, 1997, 2001; Zhu & Band, 1994). Las condiciones fueron definidas según la distribución de los atributos del terreno, índice topográfico de humedad, pendiente, profundidad del valle y altura normalizada generados a partir del MDE, dentro de cada unidad de suelo. A partir de los mapas de similitud, las propiedades del suelo fueron mapeadas con resolución de 10 metros (Figura 5) y utilizando la ecuación (Zhu et al., 1997):

$$V_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n S_{ij}^k * V^k}{\sum_{k=1}^n S_{ij}^k}$$

Dónde: V_{ij} es la propiedad del suelo en la localidad i, j , S_{ij}^k es el mapa de similitud en la localidad i, j para una clase de suelo k , n es el total de clases de suelo y V^k es el valor típico de la propiedad de suelo para la clase de suelo k . Los valores típicos de cada clase de suelo son referentes a los datos de los perfiles de suelos para arcilla y los datos estimados de CC y PMP.

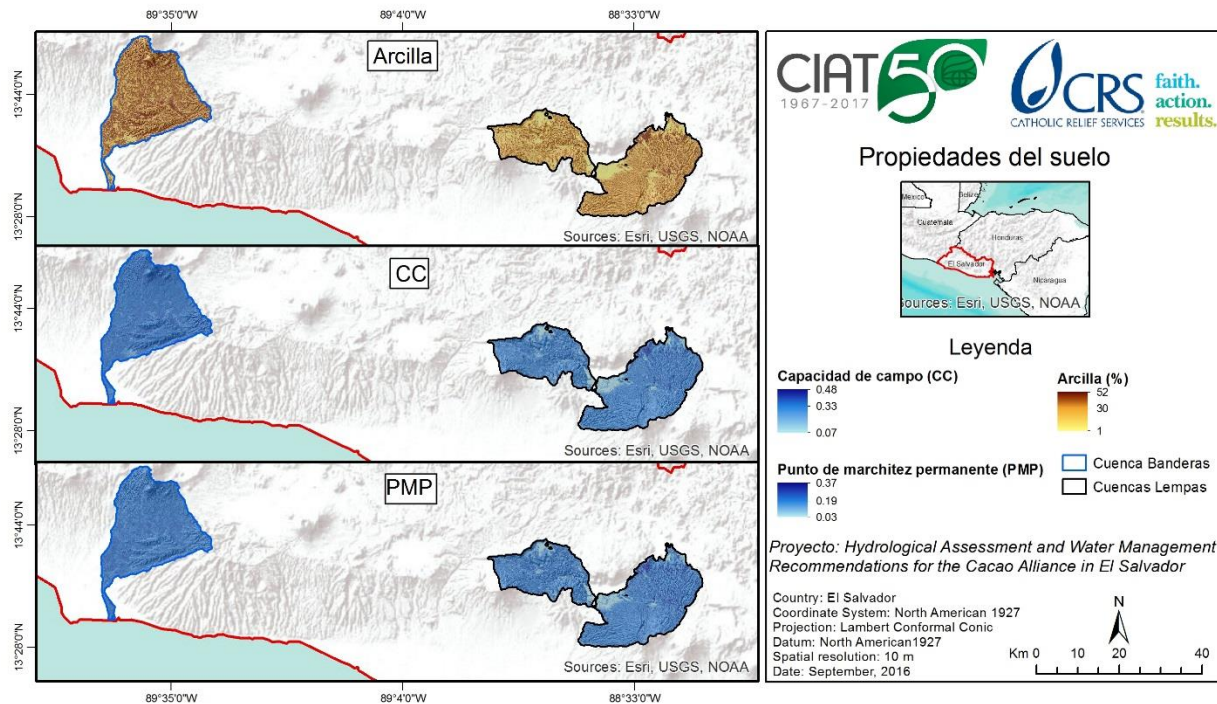


Figura 5. Mapas de arcilla, capacidad de campo (CC), y punto de marchitez permanente (PMP).

A partir de la diferencia entre los mapas de CC y PP se determinó la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (WHC) en la zona de las raíces (profundidad efectiva) (Figura 6). Para eso se consideró la profundidad efectiva de 60 cm para el cacao según descrito en la revisión bibliográfica desarrollada para

este estudio: "A.5-Brief report on state of the art of cacao phenology and critical points in the growing cycle in terms of water demand".

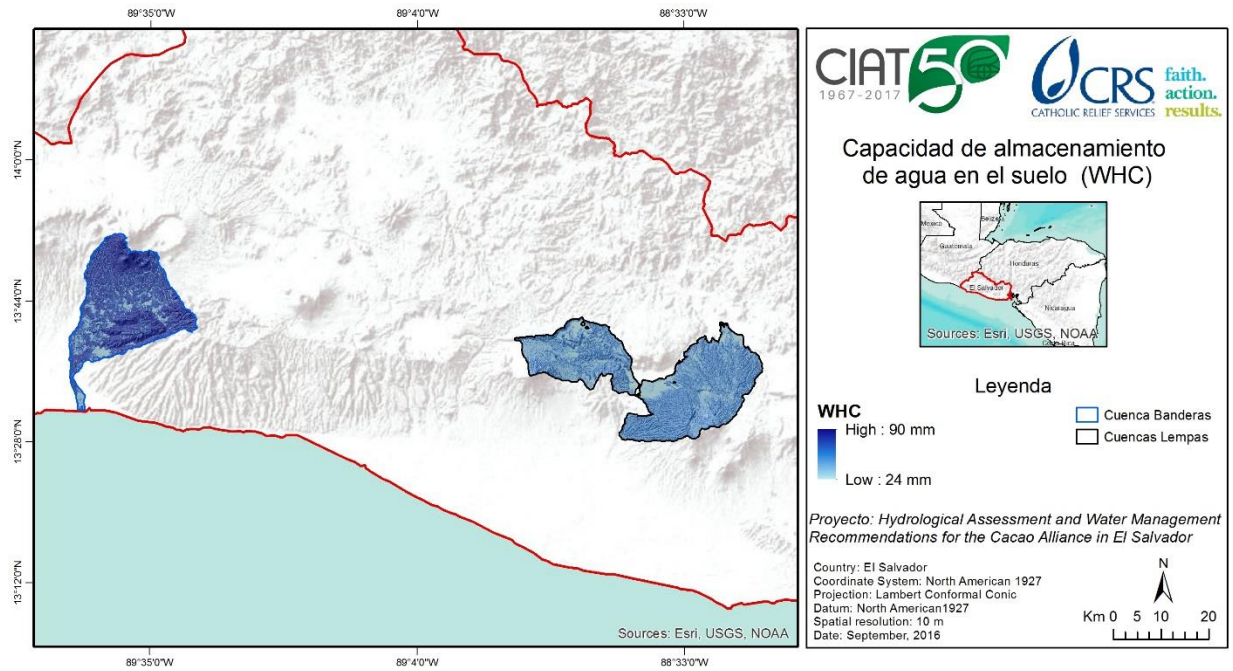


Figura 6. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (WHC)

6. Determinación del Balance Hídrico

El conocimiento del balance hídrico en una zona geográfica es de vital importancia para entender y anticipar las acciones necesarias que aseguren la sostenibilidad de cualquier sistema agropecuario y el cacao no es la excepción. En este estudio, fue usado uno de los esquemas de balance hídrico más ampliamente usado a nivel mundial como el de Thornthwaite and Mather (1955), en el cual de una forma simple es posible definir los componentes del balance hídrico a nivel mensual.

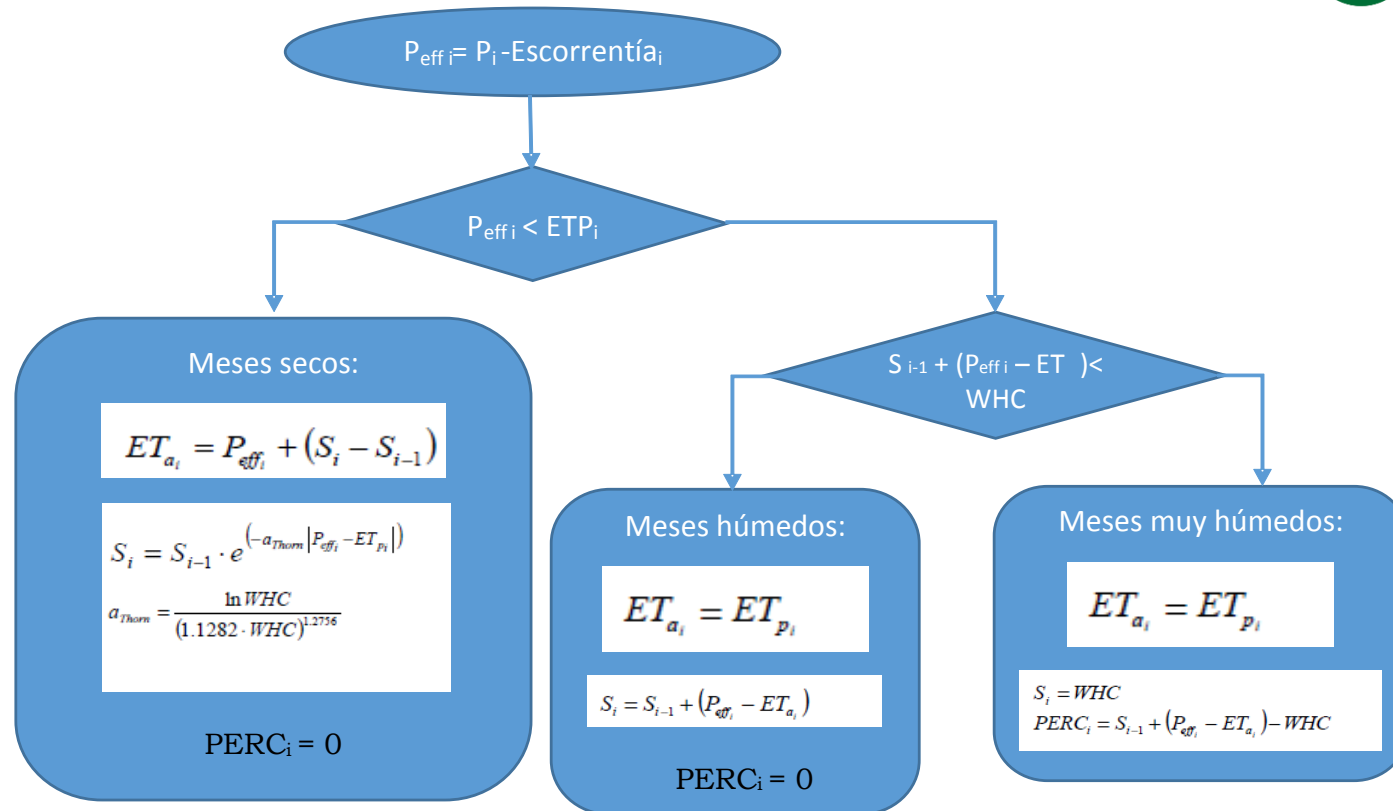
Este esquema de balance, ha sido un enfoque utilizado tanto a nivel local como global, debido a que involucra de forma explícita la mayor parte de los componentes del ciclo hidrológico, siendo fácilmente trabajado a nivel espacial o puntual (escorrentía, precipitación efectiva, humedad del suelo, percolación, evapotranspiración real y potencial). Por estas razones, ha sido usado como base para la estimación de los requerimientos hídricos de diversos sectores como el agrícola (Ferguson, 1996; Hoogeveen & Faures, 2015; Ulmen, 2000; Westenbroek et al., 2010).

En la se puede observar el esquema de balance seguido en este estudio, el cual es una adaptación del usado por Ulmen (2000) cuando realizó una estimación del balance hídrico a nivel mensual para todo Europa. En este esquema, la precipitación efectiva es la diferencia entre la precipitación mensual y la escorrentía superficial. Así, mediante la comparación con la evapotranspiración potencial se definen los meses secos o húmedos, siendo los primeros en los que la evapotranspiración superó la precipitación efectiva.

Para los meses secos, la percolación es igual a cero y el estado de humedad es definido por la ecuación mostrada en la , donde la disminución de la humedad del suelo y la evapotranspiración actual son definidas con relación a la humedad del mes anterior, la precipitación efectiva del mes actual y la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil de suelos, para este cálculo fue usada la ecuación empírica de Thornthwaite.

Para los meses más húmedos, o con precipitación efectiva mayor a la evapotranspiración potencial, y con el fin de evitar sub-estimar el consumo de agua, se asumió el valor de la evapotranspiración potencial como el valor actual. En estos meses, es posible encontrar algunos en los cuales el aumento en la humedad del suelo es menor a la capacidad de almacenamiento de agua, caso en el que no hay percolación, pero la humedad del suelo incrementa. Mientras en el caso de los meses más húmedos, el estado de humedad se asume como igual a la capacidad de almacenamiento de agua, y el exceso de humedad se asume como el valor de la percolación.

Este balance fue calculado pixel a pixel a nivel mensual desde el 2000 hasta el 2014 y para las tres zonas de estudio. Por su parte, el mes de inicio (octubre) del mismo fue estimado como el mes posterior al de mayor humedad del suelo (septiembre). Es decir, el mes posterior al que para la mayoría de pixeles o mayor parte del área la humedad del suelo estuvo por encima de la máxima capacidad de retención de agua del suelo. En este mes se asumió que la humedad de las zonas de estudio fue igual a la capacidad de campo.



Donde: P y P_{eff} son la precipitación y precipitación efectiva del mes i, ET_a y ET_p son la evapotranspiración actual y potencial del mes i, WHC es la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, S_i y S_{i-1} son la humedad del suelo del mes i y del mes i-1, a_{Thorn} es la constante empírica de Thornthwaite y PERC_i es la percolación del mes i.

Figura 7. Esquema de balance hídrico de Thornthwaite and Matther usado para la evaluación hidrológica mensual

6.1 Estimación de la escorrentía superficial

Uno de los componentes de mayor importancia en el balance realizado y que resume muchos de los aspectos de importancia hidrológica, es la determinación de la escorrentía superficial. En este caso fue estimada haciendo uso del enfoque del número de curva que relaciona la cantidad de precipitación generada en una tormenta con la escorrentía generada de acuerdo al tipo de suelo, la cobertura vegetal y la condición de humedad del suelo (Ponce & Hawkins, 1996; Williams et al., 2012).

La metodología es usada mundialmente y varios de los modelos más comunes de balance hídrico como SWAT (Soil and Water Assessment Tool) utilizan este enfoque (Volk et al., 2007; Williams et al., 2012). Esta metodología define una curva que relaciona la cantidad de precipitación a nivel diario con la escorrentía generada cada día que exista precipitación. Así, el procedimiento para definir el mapa de números de curva por pixel en las zonas de estudio siguió tres pasos. El primero fue el definir los números de curva por cada cobertura vegetal teniendo en cuenta la clasificación de coberturas de suelos y lo recomendado por el servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (USDA-SCS, 1985). El segundo fue definir el grupo hidrológico del suelo por pixel de acuerdo a la textura y demás variables de suelos descritas en la sección de mapeo de suelos. El tercero fue generar una superficie de números de curva para las tres zonas de estudio seleccionando pixel por pixel el número de curva correspondiente a la cobertura y el tipo de suelo.

Luego de obtener los números de curva para la condición de humedad promedio (CN2) (ver Tabla 2), es decir, para la condición en que la lluvia antecedente total de cinco días está entre 5 a 55 mm (Srinivasan & McDowell, 2007), es posible determinar los números de curva para la condición seca (<5 mm de lluvia) (CN1) y para una condición húmeda (> 55 mm) (CN3). De esta forma se obtuvieron tres superficies de números de curva (CN1, CN2 y CN3) para las zonas de estudio de acuerdo a las fórmulas de Williams et al (2012). Sin embargo, estos números de curva son estimados para condiciones planas (pendientes < 5%), por lo que para cada una de estas superficies se ajustó el número de curva de acuerdo a los procedimientos planteados en la misma fuente citada anteriormente.

Tabla 2. Números de curva (CN2) de las zonas de estudio de acuerdo a cada cobertura vegetal y grupo hidrológico

Cobertura/Usos de la Tierra (CLC*)	Grupo Hidrológico				Área (ha)
	A	B	C	D	
Bosque	30	55	70	77	6894.68
Bosque de mangle	92	92	92	92	0.55
Café	48	68	79	83	19020.73
Caña de azúcar	67	77	83	87	11663.67
Cuerpos de agua	92	92	92	92	634.38
Lavas volcánicas	89	92	94	95	2165.05
Mosaico de Cultivos y Pastos	57	72	79	84	48568.03
Pastos	49	69	79	84	5441.22

Cobertura/Usos de la Tierra (CLC*)	Grupo Hidrológico				Área (ha)
	A	B	C	D	
Playas, dunas y arenales	92	92	92	92	7.24
Sistemas agroforestales	45	66	77	83	8741.00
Tejido urbano	89	92	94	95	2985.40
Vegetación herbácea natural	30	48	65	73	1645.92
Total					107767.88

* Clasificación Corine Land Cover

Finalmente, se estimó la escorrentía a nivel mensual basado en la precipitación en el mismo periodo de tiempo. En este caso y debido a que en esta investigación solo se contó con información a nivel mensual, fue necesario usar la adaptación realizada por Ferguson (1996) en la que relacionó la escorrentía modelada a nivel mensual y diaria con la precipitación diaria y mensual de diferentes estaciones climáticas en los Estados Unidos haciendo uso de los números de curva. En este caso Ferguson (1996) estableció que con ecuaciones muy sencillas que contenían los números de curva, el máximo potencial de retención (S) y precipitaciones (P) en el mismo periodo de tiempo, se podía calibrar la estimación de escorrentía (Q) a nivel mensual.

La ecuación de mejor ajuste para Ferguson (1996) y que se usó en esta investigación fue:

$$Q = -0.156 + 0.210 * P/S^{0.62}$$

Esta ecuación fue desarrollada para condiciones distintas a las de El Salvador y sería de gran importancia realizar un ajuste de la misma, teniendo acceso a la información adecuada para esta labor. En la Figura 8 se puede observar el mapa de escorrentía superficial a nivel mensual para las zonas de estudio, siendo ésta mayor especialmente entre los meses de Junio a Octubre teniendo valores que llegan hasta los 35 mm/mes. Este mapa será usado como insumo para la generación del balance hídrico y la definición de los sitios potenciales de cosecha de agua lluvia.

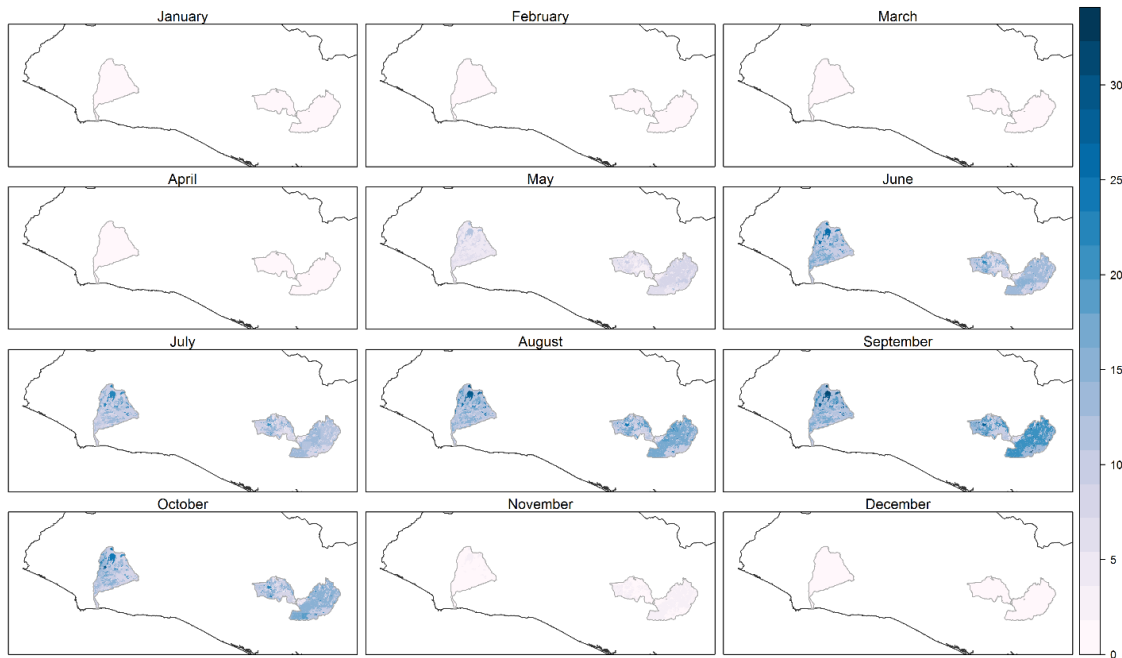


Figura 8. Estimación de la escorrentía superficial a nivel mensual entre los años 2000 y 2014

6.2 Estimación de las variables del balance hídrico a nivel mensual para las zonas de estudio

Para cada mes desde el 2000 hasta el 2014 fue calculado el balance hídrico a nivel mensual y luego se realizó un promedio mensual multianual, el cual fue usado en los posteriores análisis. Las dos variables más importantes de entrada del balance fueron las superficies de precipitación mensual de CHIRPS² y la evapotranspiración mensual de MODIS³ para el mismo periodo obtenido. Las anteriores variables junto a los mapas de números de curva descritos anteriormente y los mapas de capacidad de campo y capacidad de almacenamiento de agua (Capacidad de campo-Punto de marchitez permanente), fueron las entradas directas para el cálculo del balance hídrico.

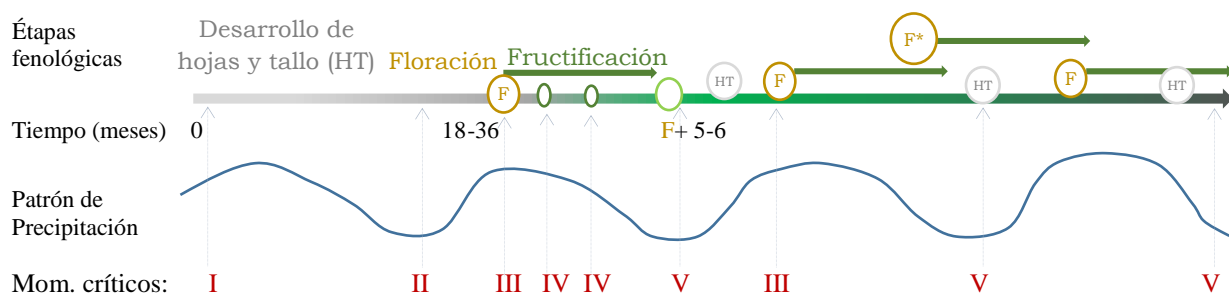
Siguiendo el esquema de la 7, se estimaron las variables de humedad del suelo, evapotranspiración actual, percolación y precipitación efectiva. Estos mapas son los insumos que serán usados para definir la disponibilidad de agua para cacao a nivel de paisaje en las zonas de estudio, lo cual se describe en las siguientes secciones.

² <http://chg.ucsb.edu/data/chirps/>

³ https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/dataproducts.php?MOD_NUMBER=16

7. Identificación de Momentos Críticos para Asegurar Disponibilidad Hídrica para el Cacao

De acuerdo al reporte realizado en el marco de esta investigación (“A.5-Brief report on state of the art of cacao phenology and critical points in the growing cycle in terms of water demand”) existen 5 momentos críticos para asegurar la disponibilidad hídrica en el ciclo de desarrollo del cultivo, los dos primeros en etapa juvenil y los siguientes 3 en edad adulta: los momentos críticos en la etapa juvenil son la siembra o trasplante y los periodos de sequía (luego de la primera floración); mientras que en la edad adulta son las floraciones; los marchitamientos naturales del fruto durante la fructificación, los cuales generalmente se presentan luego de los 1.5 y 2.5 meses después de la antesis; y las sequías (Figura 9). Para ver en detalle la descripción de cada etapa y su relación con la disponibilidad hídrica se recomienda leer el “brief referenciado en el principio de esta sección. Sin embargo, se debe recordar que todas las relaciones y momentos críticos deben hacer referencia al ciclo de la precipitación, entre otras, debido a que es el factor climático de mayor importancia sobre el rendimiento y define las acciones y manejos en el cultivo en el 95% de la producción a nivel mundial. Finalmente, se debe aclarar que es importante asegurar cierto nivel de humedad en los periodos críticos como se describe adelante, sin embargo, tener periodos de sequía o cambios bruscos en la humedad del suelo o ambiental, como en los momentos II y V de la **Figura 9** le permiten al cultivo sincronizarse y estimular su metabolismo como se describe en el *brief* sobre la metodología del cultivo.



- I – Siembra o Trasplante
- II – Sequía en edad inmadura (luego de la primera floración)
- III – Floración
- IV – Fructificación: Marchitamiento de los frutos a los 1.5 y 2.5 meses luego de la antesis
- V – Periodos de sequía en la etapa reproductiva

* Otros factores climáticos como cambios abruptos en la humedad relativa y temperaturas pueden inducir la floración

Figura 9. Momentos críticos para asegurar disponibilidad hídrica en el cultivo del cacao

7.1 Ecofisiología del cultivo del cacao y sus relaciones hídricas

De acuerdo a lo descrito en la revisión bibliográfica (“A.5-Brief report on state of the art of cacao phenology and critical points in the growing cycle in terms of water demand”) existen diversos estudios que caracterizan la respiración, fotosíntesis y demás comportamientos fisiológicos en plantas de Cacao en edad juvenil y a nivel de hojas y tallos, sin embargo, muy pocos estudios han caracterizado el consumo de agua o requerimientos hídricos del sistema agroforestal.

Así mismo, se ha encontrado que las estimaciones realizadas a nivel de hoja pueden diferir de forma drástica de los requerimientos del cultivo. Se ha encontrado que bajo un sistema agroforestal la evapotranspiración del cacao puede equivaler a un coeficiente de cultivo de 0.3 ($K_c=0.3$), mientras que la evapotranspiración del sistema puede tener un coeficiente similar a 1 ($K_c=1$), siendo lo mismo la evapotranspiración de referencia y del cultivo ($E_{To}=E_{Tc}$) (Carr & Lockwood, 2011).

Por estas razones, debido a que la Alianza del Cacao busca trabajar en sistemas agroforestales complejos, una aproximación válida fue trabajar las recomendaciones asumiendo el consumo de agua del sistema agroforestal como la evapotranspiración de referencia, esto en el caso que el balance de humedad en el suelo lo permitiera, es decir, en el caso en el que el suelo tenga tanta humedad que permita extraer del suelo la cantidad de evapotranspiración potencial. Por su parte, para los momentos en los cuales el balance de humedad no permita apropiarse la evapotranspiración de referencia para el cultivo, buscar límites críticos o mínimos en cada etapa identificada en la sección anterior.

Así, fue necesario usar las conclusiones de un estudio realizado en Malaysia con un sistema agroforestal con Cacao establecido y en producción (Kohler et al., 2009; Köhler et al., 2010; Moser et al., 2010; Schwendenmann et al., 2010). En este ensayo, los investigadores citados sometieron a estrés de desecación una plantación agroforestal de cacao durante un periodo de 13 meses y lo compararon contra un sistema vecino sin ningún estrés. De esta forma, pudieron determinar que cuando la humedad en el suelo es igual o mayor al 40% entre la capacidad de campo y punto de marchitez permanente se mantiene la producción sin mayores pérdidas. Razón por la cual se asume este nivel como un punto crítico en la edad de producción. Adicionalmente, se encontró que de haber un estrés mayor o una humedad del suelo menor al 40% el árbol se mantiene y continúa su crecimiento, solo se ve afectado su crecimiento hasta cuando se reduce la humedad por debajo del 10%, por lo que se asumió este nivel como el crítico para definir el umbral de humedad en las etapas vegetativas del árbol, tanto en edad adulta como en etapas juveniles.

Con el fin de poder determinar los dos estados relativos de humedad del suelo mencionados anteriormente, se procedió a utilizar la siguiente ecuación la cual fue tomada de Schwendenmann et al. (2010) y ajustada al contexto de este estudio:

$$ARD_i = \frac{HS_i - HS_{min}}{HS_{max} - HS_{min}}$$

Dónde: ARD_i es el agua relativa disponible en el suelo para el mes i , HS_i es la humedad del suelo en el mes i , HS_{min} es la humedad mínima del suelo y HS_{max} es la humedad máxima del suelo.

Para determinar los valores de HS_{min} y HS_{max} , inicialmente se calcularon para cada mes los percentiles 5 y 95 de la humedad real del suelo (S_i) definida en el balance hídrico (). Esto se realizó con el fin de no tomar valores atípicos dentro de las superficies de análisis. Posteriormente se determinó HS_{min} como el valor mínimo de los percentiles 5 y HS_{max} como el valor máximo de los percentiles 95.

A través de la anterior ecuación se procedió a igualar ARD_i a cada uno de los estados críticos relativos de humedad del suelo (10% y 40%) y se despejó HS_i . Posteriormente se comparó esta variable con el estado de humedad real del suelo (S_i), permitiéndonos determinar el diferencial de humedad del suelo para un mes determinado (ver Figura 10 y Figura 11). A través de estos resultados podemos determinar cuánta agua debería ser suplida en los meses más secos (color azul) para alcanzar el umbral requerido o cuándo el agua lluvia es suficiente para suplir los requerimientos hídricos de la planta (color verde) según el estado crítico de análisis.

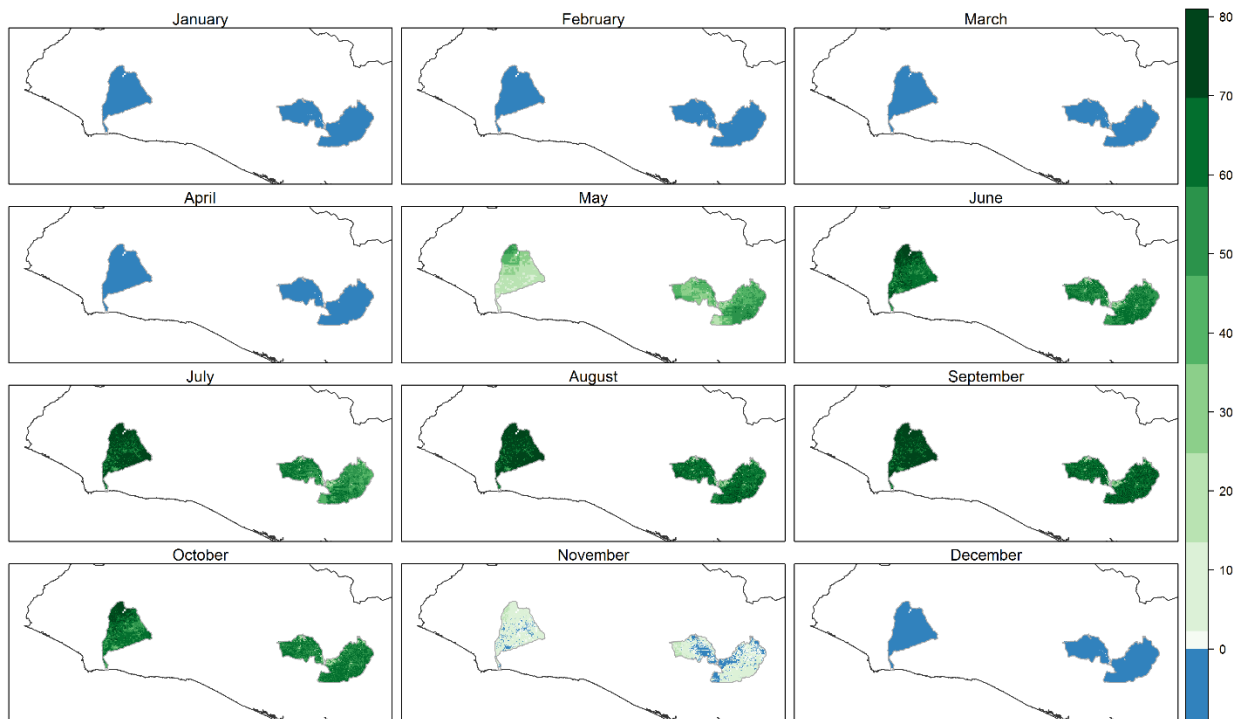


Figura 10. Contenido diferencial de humedad del suelo (mm) para mantenimiento de estado vegetativo

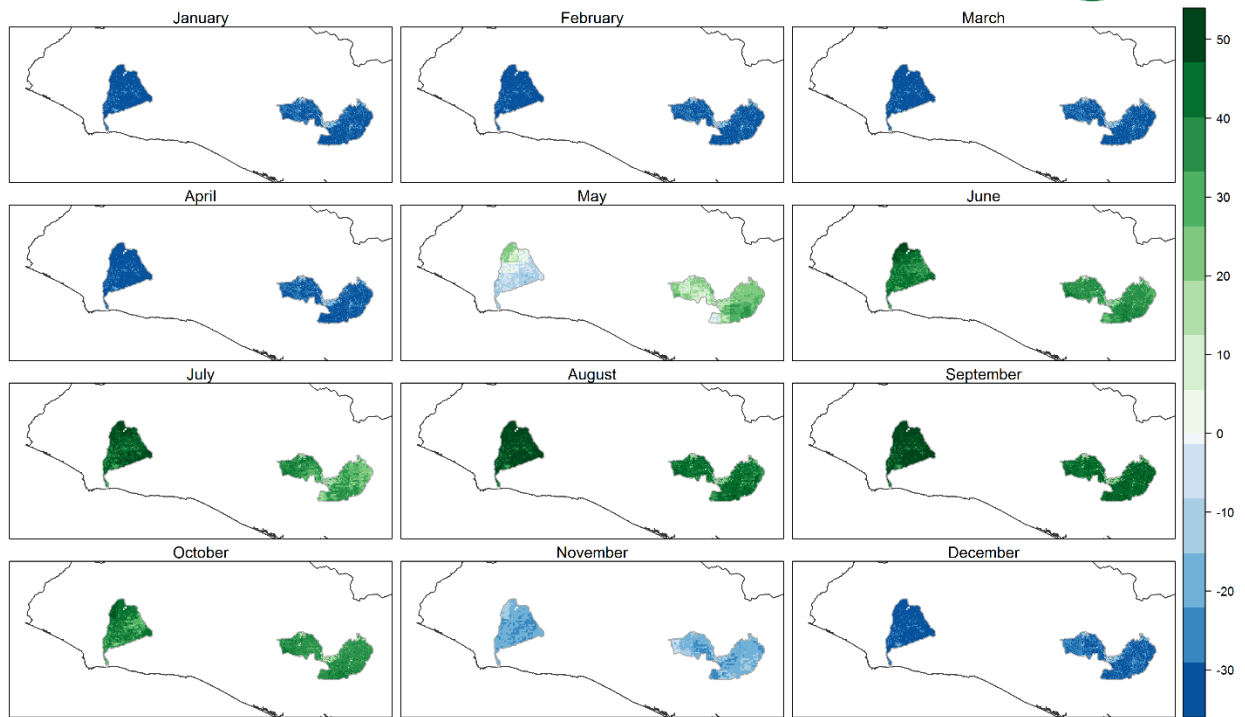
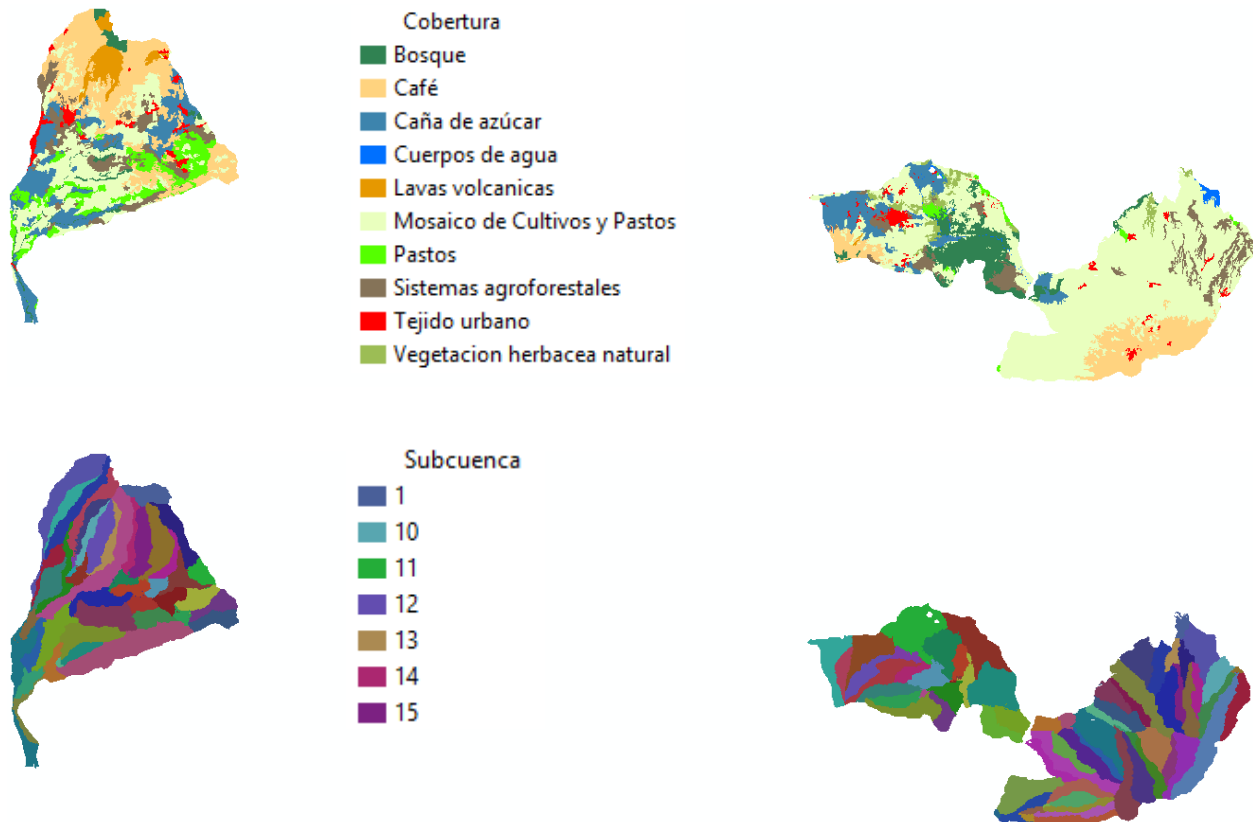


Figura 11. Contenido diferencial de humedad del suelo (mm) para adecuado rendimiento

8. Generación de Unidades de Paisaje

Con el objetivo de poder brindar las recomendaciones de manejo de agua para zonas con mayor detalle, se llevó a cabo la zonificación de las unidades de paisaje teniendo en cuenta la cobertura y uso de la tierra, la forma del paisaje, la pedología y la delimitación de subcuencas realizada específicamente para este propósito. A través de la intersección de estas cuatro capas (Figura 12), se llevaron a cabo procesos de generalizaciones definiéndose 10 ha como el tamaño mínimo para una unidad del paisaje. Esto nos permitió finalmente obtener como resultado 1310 unidades de paisaje para las tres zonas de estudio.



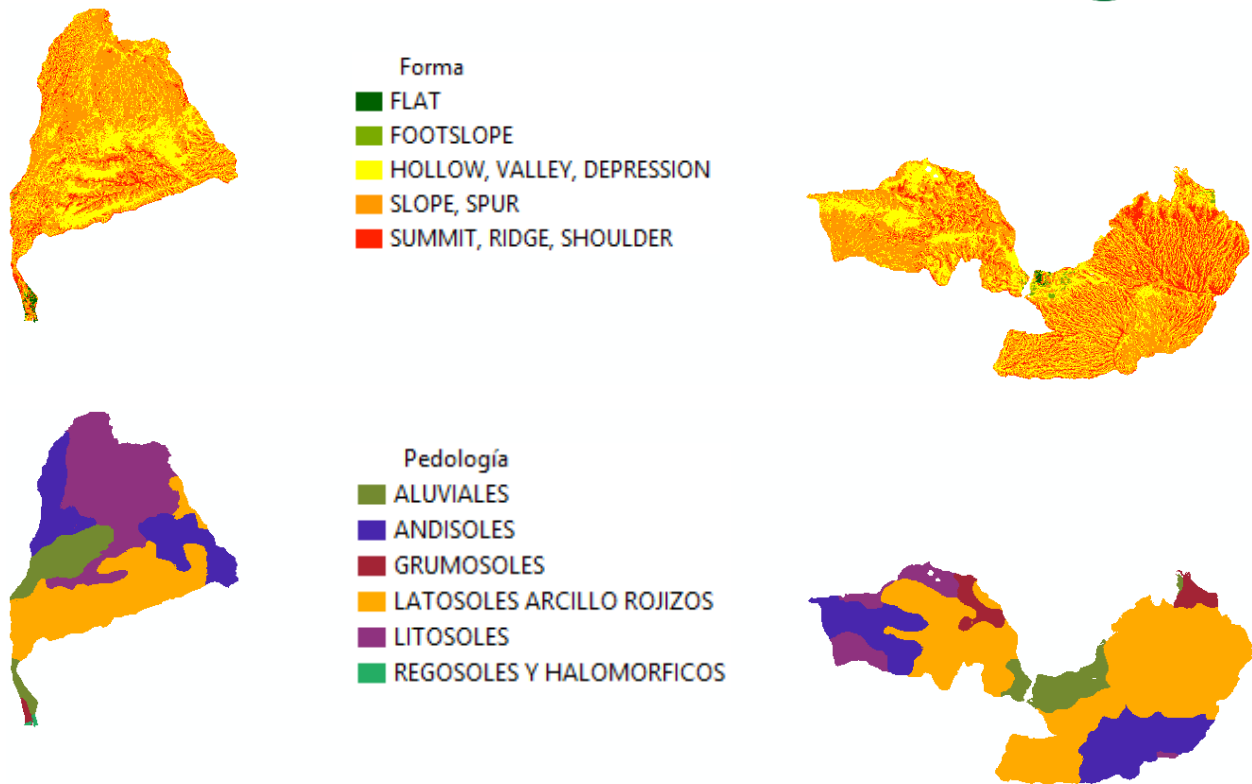


Figura 12. Capas utilizadas para la generación de unidades de paisaje

A partir de estas unidades de paisaje se procedió a hacer un resumen de todas las variables agroclimáticas obtenidas y agruparlas en una herramienta de visualización (Figura 13) la cual se entrega como anexo a este documento y que lleva el nombre “Datos_Finales.xlsm”.

Esta herramienta fue desarrollada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical en el marco del proyecto "Hydrological Assessment and Water Management Recommendations for the Cacao Alliance in El Salvador" financiado por Catholic Relief Services





Autores:

- Jefferson Valencia (j.valencia@cgiar.org)
- Fredy Monserrate (f.monserrate@cgiar.org)
- Marcela Quintero (m.quintero@cgiar.org)
- Mayesse Da Silva (m.a.dasilva@cgiar.org)

Copyright © CIAT - Centro Internacional de Agricultura Tropical 2016. Todos los Derechos Reservados

Figura 13. Herramienta de visualización de datos agroclimáticos

Con el uso de esta herramienta se puede examinar cuál es el comportamiento de las variables agroclimáticas para una unidad de paisaje determinada y de esta manera analizar los requerimientos hídricos del cacao para momentos específicos de su ciclo. A partir de esta herramienta se pueden obtener gráficos que presentan las prácticas recomendadas de manejo del suelo de acuerdo al análisis realizado en el capítulo 9.2. En las siguientes figuras (Figura 14, 15 y 16) se puede apreciar los tres tipos de gráficos que se pueden obtener y la información que proveen éstos para una determinada unidad de paisaje:

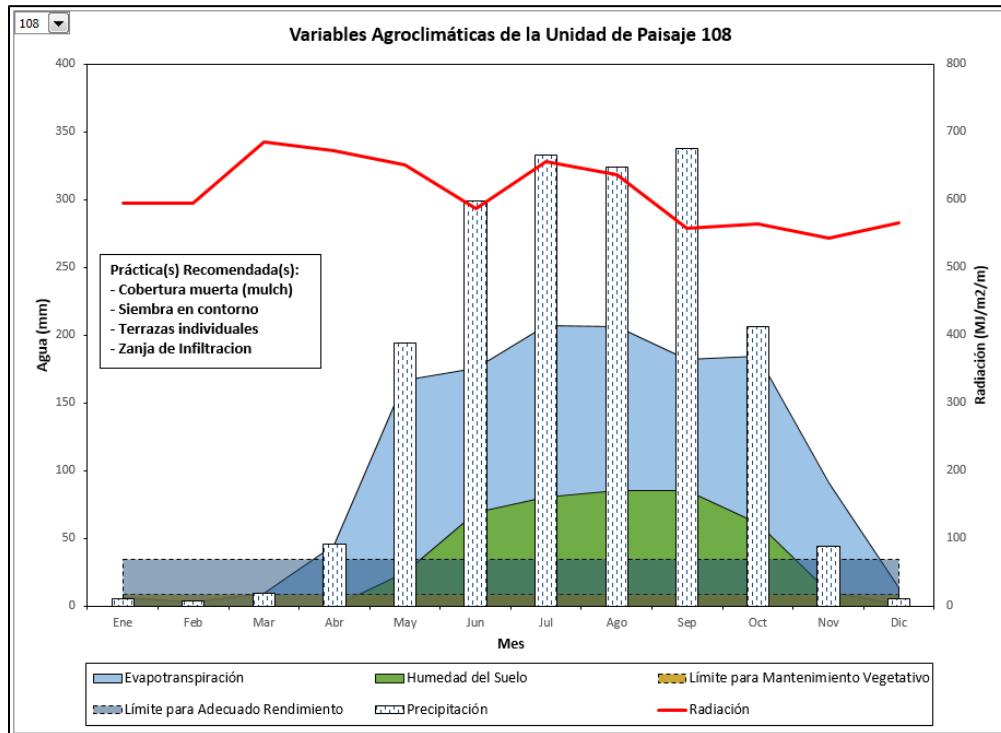


Figura 14. Gráfico de las variables agroclimáticas para una unidad de paisaje determinada

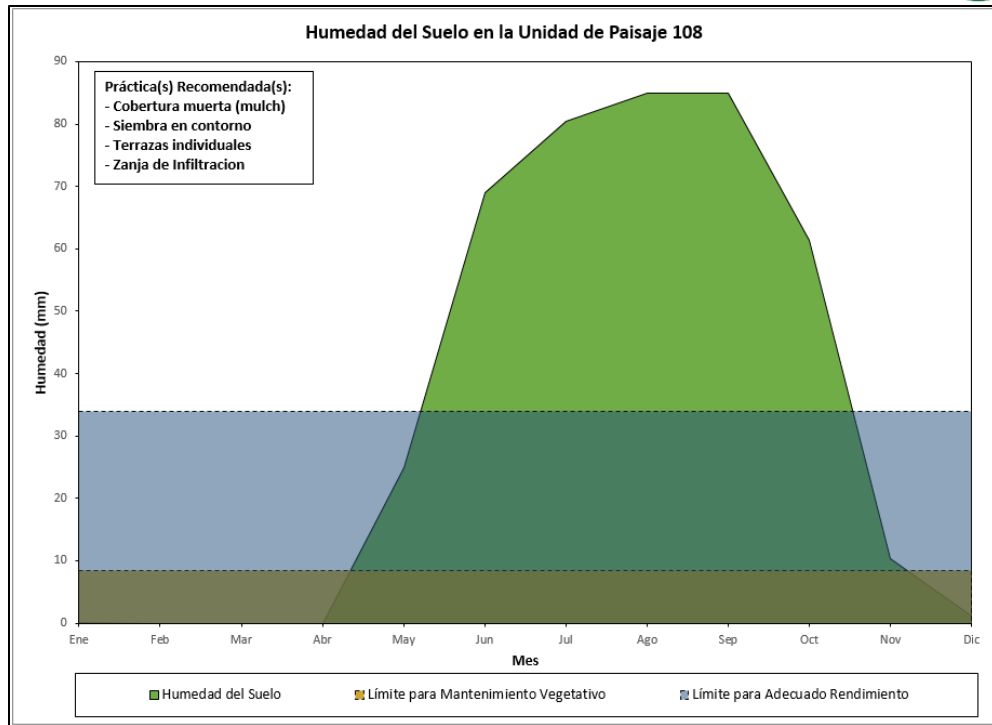


Figura 15. Gráfico de humedad del suelo para una unidad de paisaje determinada

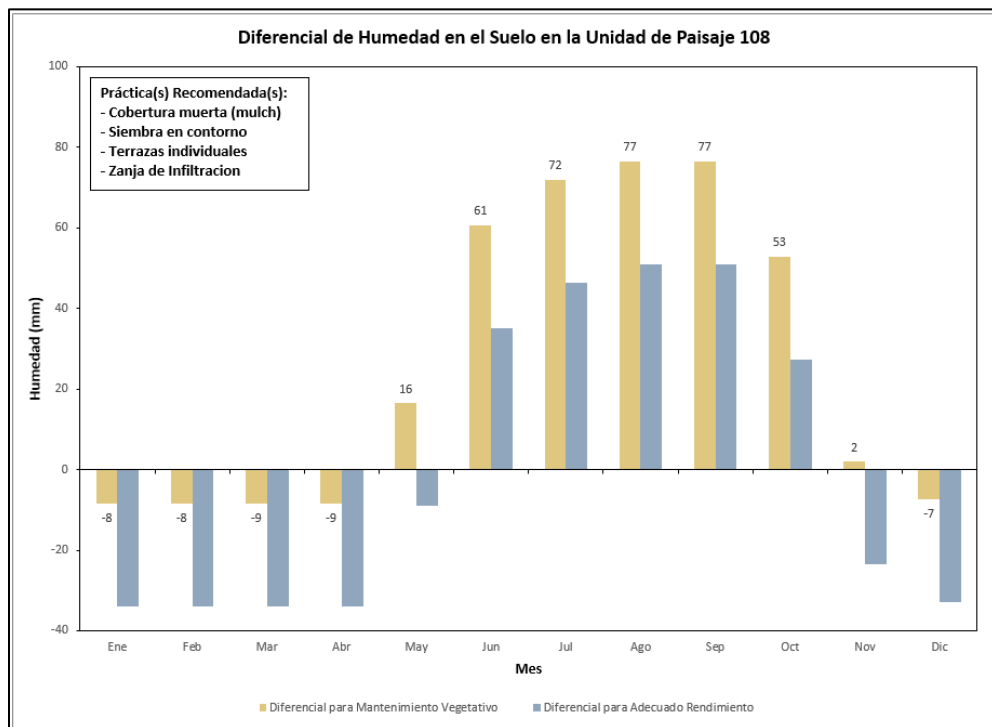


Figura 16. Gráfico de diferencial de humedad del suelo para una unidad de paisaje determinada

9. Prácticas para Aumentar la Disponibilidad Hídrica en Momentos Críticos del Cultivo de Cacao

A partir de todos los análisis realizados y resultados obtenidos, se procedió a definir soluciones prioritarias de manejo de agua y suelo para cada una de las zonas de estudio con el objetivo de incrementar la disponibilidad hídrica para el cacao en condiciones de irrigación suplementaria y secano. Estas recomendaciones son explicadas en las dos siguientes secciones.

9.1 Análisis de cosecha de agua lluvia

En este caso fueron identificados los sitios potenciales para realizar cosechas de agua lluvia de escorrentía. La identificación de los sitios se realizó de forma similar a lo desarrollado por Monserrate et al. (2016), en donde se aplicaron cuatro fases metodológicas (Figura 17). En la primera fase se construyó un índice de factibilidad de cosecha de agua (IFC), para lo que se buscó tener sitios con mayor fracción de escorrentía (relación entre la escorrentía y la precipitación), menores pendientes (%m) para facilitar la construcción del reservorio (<5%), mayores contenidos de arcillas (Ar) para evitar la filtración de agua en el suelo (>40%), mayor índice topográfico de humedad (TWI) y curvatura del terreno (C), asegurándose que el agua drene por el sitio en épocas de invierno y pueda ser almacenada y utilizada en época seca. En esta etapa se excluyeron (AE) desde un inicio rondas de ríos (50m), bosques, cuerpos de agua, lavas volcánicas, playas, dunas y arenales, y tejido urbano.

Basado en la reclasificación en cuatro categorías de cada una de las variables mencionadas anteriormente y su superposición ponderada de acuerdo a la siguiente fórmula, se generó una superficie de puntajes que permitió seleccionar áreas con mayor potencial.

$$IFC = \{4*Fe + 4*\%m + 3*Ar + 2*TWI + C\} * AE$$

En la segunda fase, se filtró el mapa de IFC seleccionando las áreas con puntajes mayores al 75% de la distribución de los datos (42 puntos) y excluyendo del resultado zonas con áreas de drenaje menores a tres hectáreas; esto último buscando tener puntos con suficiente área de drenaje de agua de escorrentía.

En el tercer paso, dentro de cada área con alto IFC, fue seleccionado el punto de mayor índice (ver Figura 18) y flujo de agua, eliminando además puntos muy cercanos uno del otro y/o que estuvieran en la misma microcuenca. Finalmente, en el cuarto paso, fue realizado un balance de agua general para el reservorio donde se sustraen las pérdidas de agua por evaporación del reservorio y filtraciones en el suelo, de la escorrentía promedio que puede ser potencialmente almacenada.

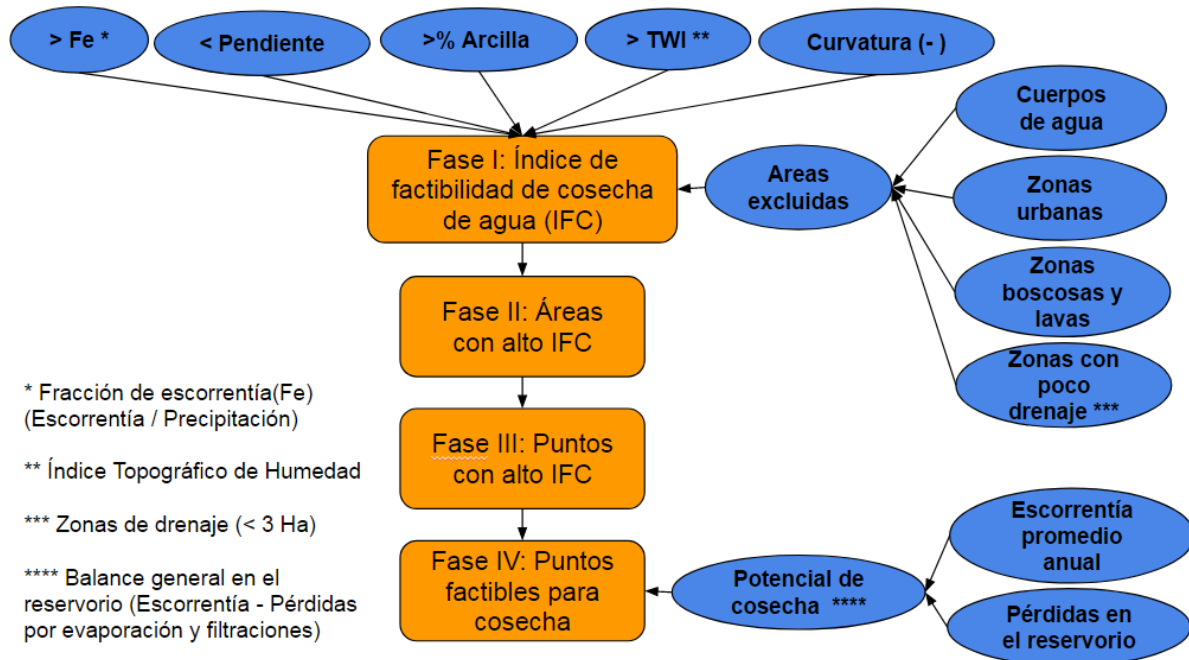


Figura 17. Esquema metodológico para identificar sitios potenciales para cosecha de agua



Figura 18. Sitios potenciales de cosecha de agua

9.2 Recomendaciones de manejo de suelo

El manejo del suelo para aumentar la infiltración y retención de agua es una importante medida para reducir los impactos negativos de la sequía en las plantas. Muchas veces las pérdidas de rendimientos de cultivos no están solamente asociadas con la distribución irregular o insuficiente de la lluvia, sino también con las porciones de precipitación que se pierden (hasta 40%) en la escorrentía (Bot & Benites, 2005). Así, es importante manejar el suelo de manera que él pueda capturar el agua de lluvia y almacenar tanta agua como sea posible para el uso futuro de la planta.

Sistemas de cultivo que promueven mayor cobertura del suelo, como los sistemas agroforestales con cacao promovidos por la Alianza Cacao, ayudan a reducir la escorrentía y por ende la erosión dado que protegen el suelo del impacto directo de la lluvia interceptando el agua en las hojas, evitando la pérdida de agua por evaporación y frenando la escorrentía (Ruedell, 1994; Silva et al., 2011). En Indonesia, pérdidas del 7% de agua del total precipitado fueron observadas en suelos sin cobertura vegetal mientras que en sistemas con cacao las pérdidas se redujeron a medida que las plantas iban creciendo pasando de 6% en cacao joven a 4% en cacao viejo; y en sistemas combinados de cacao joven con banano tuvieron pérdidas de agua del 5% (Hidayat et al., 2012). Sin embargo, en situaciones de pendientes fuertes y amenazas de sequía, como las condiciones de las zonas de estudio, otras prácticas de conservación del suelo deben ser combinadas con el fin de que contribuyan al aumento de humedad del suelo al mismo tiempo que protejan el suelo de la escorrentía.

Los resultados agroclimáticos presentes en la herramienta de visualización (Figura 13) para las zonas de estudio, muestran que en determinados momentos del año la humedad del suelo llega a ser menor que el límite para mantenimiento vegetativo del cacao arriesgando la sobrevivencia de las plantas. En esta sección listamos opciones de prácticas de manejo del suelo y agua que contribuyen a mejorar la capacidad de almacenamiento de agua en suelo y a reducir la escorrentía según las características de cada unidad de paisaje. Las prácticas recomendadas fueron compiladas y validadas para la región por el Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC, 2000). Otras fuentes de información como UNEA & FAO (2011) también fueron utilizadas para complementar la información de las prácticas. Se espera que el uso de las prácticas asociadas con el sistema agroforestal contribuyan a aumentar y prolongar la humedad del suelo minimizando los efectos de la sequía en las zonas de estudio. Sin embargo, se recomienda el monitoreo y evaluación de las prácticas en las zonas de estudio después de implementadas para cuantificar la contribución de éstas en la humedad del suelo, verificar su efectividad y realizar ajustes si necesario.

Según los aspectos del suelo (profundidad, textura, y drenaje) y paisaje (pendiente, forma), se seleccionaron las prácticas de manejo (ver lista de opciones y descripción abajo) para cada unidad de paisaje en las zonas de estudio. Las prácticas recomendadas para cada unidad de paisaje pueden ser encontradas en la herramienta de visualización (Figura 14) la cual se entrega como anexo a este documento y que lleva el nombre "Datos_Finales.xlsm".

Lista de opciones de manejo de agua en el suelo para las zonas del estudio.

Siembra en contorno

Se trata de disponer las hileras de plantas en la pendiente siguiendo las curvas de nivel con el fin de que cada hilera forme un obstáculo donde choque y retenga el agua de escorrentía. Esta práctica reduce la escorrentía y mejora la infiltración en pendientes suaves y moderadas y se utiliza tanto en zonas secas como en zonas húmedas. Para que la práctica sea efectiva, todas las labores de cultivo deben seguir las curvas de nivel.

Suelos: Se utiliza en todo tipo de suelo, desde suelos superficiales hasta suelos profundos y que sean bien drenados.

Paisaje: Contribuye al control de erosión y a la conservación del agua en pendientes mayores al 5% y en todas las formas del paisaje. Sin embargo, puede no ser muy efectiva en pendientes moderadas y fuertes cuando es utilizada sola, debiéndose utilizarla acompañada de otras prácticas. En cultivos perennes, como el cacao, contribuye significativamente al control de erosión en pendientes más fuertes una vez que la planta esté bien establecida.

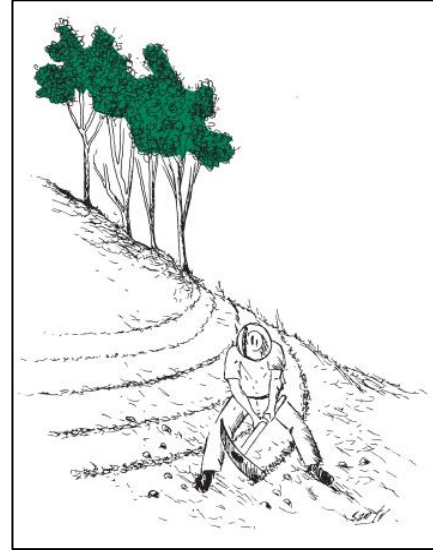


Ilustración 3. Siembra en contorno

Fuente: PASOLAC (2000)

Cobertura muerta (mulch)

Consiste en dispersar material vegetal cortado y picado en el campo para cubrir el suelo ("mulching") sin ser incorporado. Esta técnica se utiliza conjuntamente con la labranza cero o la labranza mínima. En zonas húmedas esta práctica contribuye al control de la erosión al proteger la superficie del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, reduce la velocidad de la escorrentía y contiene las partículas de suelo. Además reduce el riesgo de la sequía mejorando la infiltración y conservando la humedad del suelo siendo muy importante en zonas secas. Contribuye a mediano plazo al aumento de la materia orgánica, la fertilidad, la estructura y la vida en el suelo y también contribuye a controlar malezas. La efectividad del mulch en proteger el suelo depende del tipo del mulch y su tasa de descomposición.

Suelos: Se utiliza en suelos superficiales y profundos. No hay restricción en cuanto textura, pero en suelos mal drenados existe el riesgo de aumentar el problema de alta humedad en el suelo.



Ilustración 4. Cobertura muerta (mulch) en sistemas de cacao en El Salvador.

Paisaje: Se utiliza en todas las formas del paisaje y pendientes. Puede reducir la erosión significativamente en suelos con pendientes fuertes pero se debe combinar con otras prácticas de control de erosión en pendientes mayores al 20%.

Terraza individual

Consiste de pequeñas plataformas individuales, redondas, semicirculares o cuadradas de aproximadamente 1,2 - 2 metros de diámetro en cuyo centro se siembran normalmente cultivos perennes. Al igual que las demás terrazas, consisten en un corte y un relleno compactado pero no son continuas. La función principal es la conservación de humedad a través de la acumulación e infiltración del agua. Otra finalidad es un mejor aprovechamiento de los fertilizantes reduciendo la pérdida por escorrentía. Se puede utilizar en todas las zonas climáticas. Sin embargo, su efecto de conservación de agua es más importante en zonas secas y se recomienda combinar con la aplicación de mulch para mejorar la retención de humedad. En zonas húmedas se recomienda un pequeño desagüe de cada terraza hacia un lado.

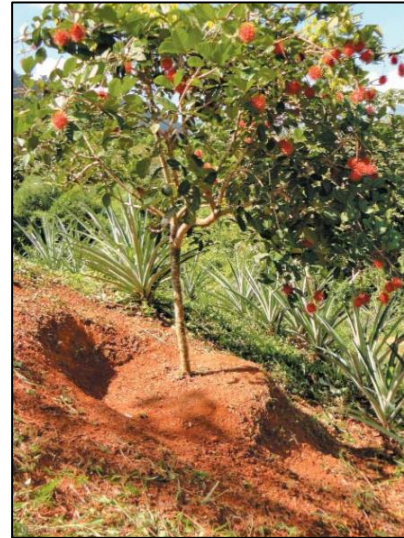


Ilustración 5. Terraza individual

Fuente: FHIA (2011)

Suelos: En suelos arenosos es difícil construir terrazas estables. Se utiliza sobre todo en suelos profundos y bien drenados. En suelos moderadamente profundos se utiliza hasta cierta pendiente. Sin embargo, existen experiencias campesinas en suelos superficiales de acumular la tierra en terrazas individuales para mejorar las condiciones para árboles.

Paisaje: Recomendadas para formas del paisaje tipo cumbre, inclinadas y piedemontes, se utiliza sobre todo en pendientes fuertes hasta un 60%. En zonas secas se utiliza también en pendientes suaves para aprovechar mejor el agua.

Acequias a nivel

Esto son zanjas o canales de forma trapezoidal construidas a nivel en dirección transversal a la pendiente. La principal finalidad de la acequia es la conservación de agua sirviendo como acumulador de ésta y mejorando la infiltración en la zanja. Por esta razón se utiliza en el trópico seco y subtrópico seco. En zonas húmedas existe el riesgo de la acumulación de agua y la sobresaturación del suelo. Sin embargo, la acequia contribuye a la conservación de suelo en combinación con camellones, barreras vivas, barreras muertas y otras prácticas dividiendo la parcela en pendientes cortas. Se combina bien con otras prácticas que mejoran la infiltración en el terreno mismo o con técnicas que mejoran la fertilidad del suelo. Según datos del CENTA citados por Argueta (2000) y CRS - Iniciativa Global del Agua (2014), las acequias contribuyeron para infiltrar $7400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ al año en Guaymango y San Juan Opico, El Salvador, mientras que la erosión del suelo fue reducida en 40 t.ha^{-1} al año.



Ilustración 6. Acequia en nivel

Fuente: PASOLAC (2000)

Suelos: La construcción de acequias suficientemente profundas se dificulta en suelos muy superficiales por eso se recomienda utilizarla en suelos profundos y bien drenados. En suelos arcillosos de baja infiltración se deben hacer acequias más profundas. En suelos arenosos es mejor estabilizar los taludes de la acequia con barreras vivas o muertas.

Paisaje: La construcción de acequias requiere de bastante mano de obra. Por eso se justifica en pendientes más fuertes (15-30%) en zonas semi-secas. En pendientes de 30-50% es aconsejable alternarlas con otras obras de conservación para evitar que las acequias queden muy cercanas entre sí, además de contribuir para retener el suelo en la parcela y reducir la entrada de suelo en la acequia.

10. Conclusiones

Las tres zonas priorizadas presentan diferencias en cuanto al tipo de suelo y características del relieve lo cual hace que el comportamiento hídrico sea distinto entre ellas. La cuenca Banderas, la cual se encuentra más al occidente del país, presenta en general áreas con mayores contenidos de arcilla y suelos más estables que las cuencas Lempa. A su vez, las cuencas Lempa poseen relieves más erosionados y suelos de carácter más arenoso en depresiones. Estas condiciones reflejan una mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en la cuenca Banderas que en las cuencas Lempa. Sin embargo, la implementación de prácticas de manejo del suelo como cobertura muerta, siembra en contorno, terrazas y acequias en contorno ayudan al suelo a mejorar la captura y almacenamiento del agua lluvia para el uso futuro de la planta al mantener la humedad del suelo por más tiempo después de haber terminado las lluvias.

En este estudio también fueron identificadas, según la ecofisiología del cacao y las condiciones agroclimáticas de las tres zonas estudiadas, los contenidos de humedad del suelo necesarios para mantenimiento de estado vegetativo y para adecuado rendimiento del cacao durante todos los meses del año. Las regiones presentan una ventana de 6 meses (desde Noviembre hasta Abril) de total seguía para adecuado rendimiento en el cual se debe tener en consideración la fase en la que se encuentra el cultivo para determinar la necesidad o no de riego suplementario. Durante las visitas de campo se identificó que distintas variedades de cacao y arreglos agroforestales están siendo implementadas y evaluadas entre los beneficiarios de la Alianza Cacao. Eso resulta en sistemas con fases de desarrollo diferenciados y por lo tanto las recomendaciones de riego suplementario deben ser realizadas sistemáticamente por unidad del paisaje tomando en consideración las condiciones agroclimáticas de la finca y los momentos críticos donde se debe asegurar agua para el cacao según la fase en que se encuentra el cultivo: los momentos críticos son principalmente durante la siembra o trasplante y luego de la primera floración (etapa juvenil); y durante las floraciones y los marchitamientos naturales del fruto durante la fructificación (edad adulta). La información detallada por unidad del paisaje disponible en la herramienta de visualización que se entrega junto con este informe permite que el técnico de la Alianza Cacao en conjunto con el productor identifique las condiciones agroclimáticas de la finca y teniendo en cuenta la fase del cultivo determine la necesidad y el momento de aplicar riego. Además, en la herramienta de visualización también fueron identificadas prácticas de manejo del suelo para cada zona del paisaje con el fin de interceptar la escorrentía superficial asegurando mayor infiltración y retención de humedad por más tiempo en suelo y así reducir la ventana de sequía.

En las situaciones donde se identifica la necesidad de riego, el productor y la Alianza pueden estratégicamente construir reservorios de cosecha de agua de lluvia según los puntos potenciales de cosecha identificados en este estudio y que también se entregan juntamente con este informe.

Debido a la ausencia de datos específicos para las zonas del estudio, mucha de la información utilizada en ese estudio es originaria de otros estudios en condiciones similares y/o a nivel del país. Por lo tanto, se recomienda un acompañamiento y monitoreo de los cultivos en cuanto a: los requerimientos hídricos

reales de los arreglos agroforestales implementados por la Alianza; las condiciones de suelos por sitio específico (utilizando datos locales) y efectividad de las prácticas de manejo de suelo para garantizar mayor retención de humedad del suelo; análisis de costo del riego suplementario en relación a la ganancia en productividad y considerando todas las otras prácticas implementadas para asegurar humedad en el suelo para los cultivos.

11. Referencias Bibliográficas

- Argueta, O. (2000). *Valoración de la acequia de ladera como alternativa para el uso sostenible de los suelos en El Salvador*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Ashtekar, J. M., & Owens, P. R. (2013). Remembering Knowledge: An Expert Knowledge Based Approach to Digital Soil Mapping. *Soil Horizons*, 54(5), 1–6. <http://doi.org/10.2136/sh13-01-0007>
- Ashtekar, J., Owens, P. R., Brown, R. A., Winzeler, H. E., Dorantes, M., Libohova, Z., Dasilva, M., & Castro, A. (2014). Digital mapping of soil properties and associated uncertainties in the Llanos Orientales, South America. In A. B. M. Dominique Arrouays, Neil McKenzie, Jon Hempel, Anne Richer de Forges (Ed.), *GlobalSoilMap* (pp. 367–372). CRC Press. <http://doi.org/10.1201/b16500-67>
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The importance of soil organic matter*. *FAO Soils Bulletin*. <http://doi.org/10.1080/03650340214162>
- Carr, M. K. V., & Lockwood, G. (2011). THE WATER RELATIONS AND IRRIGATION REQUIREMENTS OF COCOA (THEOBROMA CACAO L.): A REVIEW. *Experimental Agriculture*, 47(4), 653–676. <http://doi.org/10.1017/S0014479711000421>
- CRS - Iniciativa Global del Agua. (2014). *Prácticas de Agricultura para Mejorar la Productividad del Agua en Sistemas de Producción de Secano en Centroamérica*. (Equipo GWI (Iniciativa Global del Agua), Ed.). San Salvador. Retrieved from <http://www.gwicentroamerica.org/assets/pdfjs/web/viewer.html?file=/system/balloom/asset/documents/attachments/000/001/255/original/CRS-PRACTICAS-MAYO-BAJARES.pdf?1459549755>
- Da Silva, M., Silva, M., Owens, P., Curi, N., & Oliveira, A. (2016). Predicting Runoff Risks by Digital Soil Mapping. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 40, 1–13. <http://doi.org/10.1590/18069657>
- Ferguson, B. (1996). Estimation of direct runoff in the Thornthwaite water balance. *Professional Geographer*, 48(3), 263–271.
- FHIA. (2011). *Guía sobre prácticas de conservación de suelos/Proyecto Promoción de Sistemas Agroforestales de Alto Valor con Cacao en Honduras* (Segunda ed). La Lima, Cortés:FHIA.
- Hidayat, Y., Murtilaksono, K., & Sinukaban, N. (2012). Characterization of Surface Runoff, Soil Erosion and Nutrient Loss on Forest-Agriculture Landscape. *J Trop Soils*, 17(3), 259–266. <http://doi.org/10.5400/jts.2012.17.3.259>
- Hoogeveen, J., & Faures, J. (2015). GlobWat—a global water balance model to assess water use in irrigated agriculture (discussion paper). *Hydrology and Earth ...*
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. F. (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147–156. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. *Geographical Review* (Vol. 35). New York: McGraw-Hill. <http://doi.org/10.2307/211491>

- Köhler, M., Dierick, D., Schwendenmann, L., & Holscher, D. (2009). Water use characteristics of cacao and *Gliricidia* trees in an agroforest in Central Sulawesi, Indonesia. *Ecohydrology*, 2(4), 520–529. <http://doi.org/10.1002/eco.67>
- Köhler, M., Schwendenmann, L., & Hölscher, D. (2010). Throughfall reduction in a cacao agroforest: tree water use and soil water budgeting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 1079–1089. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.005>
- McBratney, A., Mendonça Santos, M. ., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Monserate, F., Valencia, J., Quintero, M., Hyman, G., Da Silva, M., Coppus, R., Bautista, O., Rivera, O., León, J., & Manueles, A. (2016). Aumentando la resiliencia climática en el occidente de Honduras: explorando fuentes de agua para pequeños productores rurales. *CGSpace: A Repository of Agricultural Research Outputs*. United States Agency for International Development (USAID); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Escuela Agrícola Panamericana Zamorano (EAP Zamorano). Retrieved from <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/73454>
- Moser, G., Leuschner, C., Hertel, D., Hölscher, D., Köhler, M., Leitner, D., Michalzik, B., Prihastanti, E., Tjitrosemito, S., & Schwendenmann, L. (2010). Response of cocoa trees (*Theobroma cacao*) to a 13-month desiccation period in Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 79(2), 171–187. <http://doi.org/10.1007/s10457-010-9303-1>
- PASOLAC, Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. (2000). *Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua*. <http://www.pasolac.org.ni/> (1a. ed.). San Salvador- El Salvador.
- Ponce, V., & Hawkins, R. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- Ruedell, J. (1994). Pesquisa em plantio direto na palha e sua importância. In *IV Encontro nacional de plantio direto na palha* (pp. 90–105). Cruz Alta.
- Saxton, K., & Rawls, W. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1569–1578. <http://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Schwendenmann, L., Veldkamp, E., Moser, G., Hölscher, D., Köhler, M., Clough, Y., Anas, I., Djajakirana, G., Erasmí, S., Hertel, D., Leitner, D., Leuschner, C., Michalzik, B., Propastin, P., Tjoa, A., Tschardtke, T., & van Straaten, O. (2010). Effects of an experimental drought on the functioning of a cacao agroforestry system, Sulawesi, Indonesia. *Global Change Biology*, 16(5), 1515–1530. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02034.x>
- Silva, M. A. da, Silva, M. L. N., Curi, N., Avanzi, J. C., & Leite, F. P. (2011). Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. *Ciência Florestal*, 21(4), 765–776. Retrieved from <http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/cienciaflorestal/article/view/4520/3540>
- Srinivasan, M. S., & McDowell, R. W. (2007). Hydrological approaches to the delineation of critical-source areas of runoff. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(2), 249–265. <http://doi.org/10.1080/00288230709510293>

- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). The water balance. *Publications in Climatology*, 8(1).
- Ulmen, C. (2000). Modelling raster-based monthly water balance components for Europe.
- UNEA, & FAO. (2011). *Prácticas de Conservación de Suelos y Agua para la Adaptación Productiva a la Variabilidad Climática. Organización De Las Naciones Unidas Para La Alimentación Y La Agricultura (Fao)*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-as431s.pdf>
- USDA-SCS. (1985). *National Engineering handbook, section 4- hydrology*. Washington, D.C.
- Volk, M., Arnold, J. G., Bosch, D. D., Allen, P. M., & Green, C. H. (2007). Watershed Configuration and Simulation of Landscape Processes with the SWAT Model. In M. and S. S. of A. and N. Zealand (Ed.), *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation* (pp. 74–80). Canberra, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- Westenbroek, S., Kelson, V., & Dripps, W. (2010). SWB-A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge.
- Williams, J. R., Kannan, N., Wang, X., Santhi, C., & Arnold, J. G. (2012). Evolution of the SCS Runoff Curve Number Method and Its Application to Continuous Runoff Simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(11), 1221–1229. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000529](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000529)
- Zhu, A.-X. (1997). A similarity model for representing soil spatial information. *Geoderma*, 77(2–4), 217–242. [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00023-2](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00023-2)
- Zhu, A.-X., & Band, L. (1994). A knowledge-based approach to data integration for soil mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3386143>
- Zhu, A.-X., Band, L. E., Dutton, B., & Nimlos, T. J. (1996). Automated soil inference under fuzzy logic. *Ecological Modelling*, 90(2), 123–145. [http://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00161-1](http://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00161-1)
- Zhu, A.-X., Band, L., Vertessy, R., & Dutton, B. (1997). Derivation of Soil Properties Using a Soil Land Inference Model (SoLIM). *Soil Science Society of America Journal*, 61(2), 523–533. <http://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100020022x>
- Zhu, A. X., Hudson, B., Burt, J., Lubich, K., & Simonson, D. (2001). Soil Mapping Using GIS, Expert Knowledge, and Fuzzy Logic. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1463–1472. <http://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551463x>