



Evaluación Hidrológica Superficial del Departamento de Ahuachapán, El Salvador

Iniciativa Raíces-Ahuachapán

Jefferson Valencia, Marcela Quintero, Mayesse da Silva y Javier Martín

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)

Cali, Colombia

Septiembre, 2018

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	4
2. Objetivos.....	5
3. Fuentes de Información.....	6
4. Descripción del Área de Estudio.....	8
5. Estructuración de Información.....	9
5.1 Modelo Digital de Elevación (MDE).....	9
5.2 Datos climatológicos e hidrométricos.....	10
5.2.1 Interpolación de datos de precipitación.....	14
5.2.1 Evapotranspiración potencial.....	16
5.2.2 Análisis de datos de caudal.....	17
5.3 Coberturas/Usos del suelo.....	18
5.1 Suelos y sus derivados.....	19
6. Determinación del Balance Hídrico.....	21
6.1 Estimación de la escorrentía superficial.....	24
6.2 Estimación de las variables del balance hídrico a nivel mensual para la zona de estudio.....	26
7. Implicaciones para la Iniciativa.....	31
8. Referencias Bibliográficas.....	32

Lista de Tablas

Tabla 1. Fuentes de información seleccionada	6
Tabla 2. Catálogo de estaciones obtenidas con información de precipitación	10
Tabla 3. Porcentajes de datos faltantes de las estaciones de precipitación del MARN	13
Tabla 4. Catálogo de estaciones obtenidas con información de caudales	17
Tabla 5. Números de curva (CN2) de acuerdo a cada grupo hidrológico y coeficiente de cultivo (kc).....	18
Tabla 6. Cálculo de la constante de recesión (k)	24

Lista de Figuras

Figura 1. Localización general del área de estudio.....	8
Figura 2. MDE de Ahuachapán	9
Figura 3. Distribución espacial de estaciones obtenidas con información de precipitación.....	10
Figura 4. Climatología del departamento de Ahuachapán	12
Figura 5. Ejemplo del llenado de datos faltantes de una estación climatológica	14
Figura 6. Estaciones utilizadas para la interpolación de datos de precipitación	15
Figura 7. Precipitación mensual interpolada (1 km).....	15
Figura 8. Evapotranspiración potencial (1 km).....	16
Figura 9. Series de caudal de las estaciones hidrométricas	17
Figura 10. Coberturas/Usos del suelo del departamento de Ahuachapán	19
Figura 11. Suelos y sus derivados del departamento de Ahuachapán	20
Figura 12. Esquema de balance hídrico de Thornthwaite and Matther usado para la evaluación hidrológica mensual.....	22
Figura 13. Determinación de la constante de deflexión (α) con datos de la estación HC-00 (izquierda) y HC-01 (derecha)	23
Figura 14. Escorrentía superficial a nivel mensual entre los años 2000 y 2012	26
Figura 15. Precipitación efectiva a nivel mensual entre los años 2000 y 2012	27
Figura 16. Almacenamiento de agua en el suelo a nivel mensual entre los años 2000 y 2012	28
Figura 17. Evapotranspiración real a nivel mensual entre los años 2000 y 2012.....	28
Figura 18. Percolación a nivel mensual entre los años 2000 y 2012	29
Figura 19. Flujo base a nivel mensual entre los años 2000 y 2012.....	29
Figura 20. Aporte de agua al caudal a nivel mensual entre los años 2000 y 2012.....	30
Figura 21. Esquema de sinergias entre los enfoques de evaluación hidrológica	31

1. Introducción

Catholic Relief Services (CRS) está liderando la iniciativa “Raíces-Ahuachapán” (referida como Agricultural Landscape Restoration Initiative – ALRI en inglés), una iniciativa para promover agricultura restaurativa en paisajes críticos del departamento de Ahuachapán. Esta iniciativa está siendo financiada por la Fundación Howard G. Buffet y en estos momentos se encuentra en la fase 1/4 del plan estratégico propuesto hasta el 2030. CRS está implementando esta iniciativa en conjunto con tres instituciones del ámbito nacional (PRISMA, AZURE y CARITAS) y con el apoyo del Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, además de contar con el soporte de diferentes socios locales.

La restauración de paisaje que se piensa realizar a través de esta iniciativa tiene como objetivo asistir a la recuperación de ecosistemas degradados, dañados o destruidos. Además, de implementar mejoras en tierras que han sido degradadas a una escala que permita la reconstrucción de la integridad ecológica y el mejoramiento de la vida de las personas. Dentro de los componentes de la iniciativa se quiere llevar a cabo la restauración de los servicios agroecosistémicos con un enfoque en la protección de los recursos hídricos en importantes áreas agrícolas.

Basado en lo anterior, CIAT ha sido encargado de realizar una evaluación hidrológica del departamento de Ahuachapán que permita la identificación de áreas claves en la contribución de agua superficial tanto en época seca como de lluvia, a través de la combinación de herramientas de modelación hidrológica y sistemas de información geográfica (SIG).

2. Objetivos

- Desarrollar un enfoque metodológico para la evaluación hidrológica superficial del departamento de Ahuachapán, El Salvador.
- Definir las implicaciones de los análisis hidrológicos para la estrategia de la iniciativa Raíces-Ahuachapán.

3. Fuentes de Información

A partir de la información que fue suministrada por múltiples fuentes, incluyendo al equipo del Ing. Duarte, 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

Capa	Descripción/Comentario
MDE	Modelo Digital de Elevación con resolución espacial de 10 m generado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 10 m, red hidrográfica y cuerpos de agua del departamento de Ahuachapán. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).
Cobertura/Usos del Suelo	Mapa de cobertura/uso de la tierra con clasificación CORINE Land Cover a escala 1:50,000 generado con imágenes RapidEye. Fuente: MARN (2012).
Red Hídrica	Publicada por el MARN, la cual fue generada a partir de los cuadrantes topográficos a escala 1:25,000 para el país. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (1983).
Cuerpos de Agua	Tomados de la capa de cobertura/uso del suelo del MARN.
Estaciones Meteorológicas	Se obtuvieron datos de estaciones del MARN y del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH). MARN: 25 estaciones con series mensuales de precipitación para el país. Huecos presentes en varios años (1981-2012). PNGIRH-MARN: 10 estaciones con series mensuales de precipitación completadas mediante valores interpolados para el departamento de Ahuachapán (1965-2012).
Suelos	Información de suelos proveídos para el proyecto. Para mayor información, refiérase al estudio de Mapeo Digital de Suelos (MDS).
CHIRPS	Precipitación mensual y de los últimos 5 días de cada mes (pentadiaria) (2000-2012). Fuente: http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/ .

Capa	Descripción/Comentario
MODIS (MOD16)	Evapotranspiración potencial de MODIS a nivel mensual (2000-2012). http://www.ntsg.umd.edu/project/modis/mod16.php .
Otras Capas	Unidades hidrogeológicas caracterizadas por su nivel de infiltración y fallas geológicas del departamento de Ahuachapán. Fuente: Grupo del Ing. Duarte.

4. Descripción del Área de Estudio

El área de estudio para la evaluación hidrológica superficial de la iniciativa Raíces-Ahuachapán, como su nombre lo dice, es el departamento de Ahuachapán, en El Salvador (Figura 1). Éste es uno de los 14 departamentos que conforman a El Salvador y se encuentra ubicado al oeste del país, colindando al norte con el departamento de Santa Ana, al noreste y al este con el departamento de Jutiapa de Guatemala (siendo el río Paz el límite entre ellos), al sur con el Océano Pacífico y al oeste con el departamento de Sonsonate. Su área es aproximadamente 1,180 km² y su capital es la ciudad de Ahuachapán. Entre las coberturas/ usos del suelo predominantes en el departamento al 2012 están los Granos Básicos (24.14%), Café (24.11%), Cultivos Anuales Asociados con Cultivos Permanentes (9.06%) y Mosaico de Cultivos y Pastos (6.58%) (Figura 10). La superficie continental de este departamento se despliega desde el nivel del mar hasta los 1,918 msnm (Figura 2). Las lluvias más intensas se presentan en el mes de Septiembre con valores que pueden estar alrededor de 380 mm/mes, mientras que los meses Diciembre-Marzo representan la temporada seca (ver Figura 4).



Figura 1. Localización general del área de estudio

5. Estructuración de Información

En este capítulo se explican los procesos realizados para la estructuración de información de entrada para el balance hídrico superficial del departamento de Ahuachapán.

5.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Para la generación de esta superficie se utilizaron la red hidrográfica, cuerpos de agua y curvas de nivel con equidistancia de 10 m del departamento. Mediante el uso de estas capas se ejecutó el método de interpolación ANUDEM¹ versión 5.3, el cual genera un MDE hidrológicamente corregido, es decir, que incorpora los patrones reales de drenaje del territorio. Esto se hizo mediante ArcGIS a través del uso de la herramienta *Topo to Raster*². Todo este proceso fue llevado a cabo por el grupo encargado de realizar el Mapeo Digital de Suelos (MDS). El MDE resultante tiene resolución espacial de 10 m y se puede observar en la Figura 2.

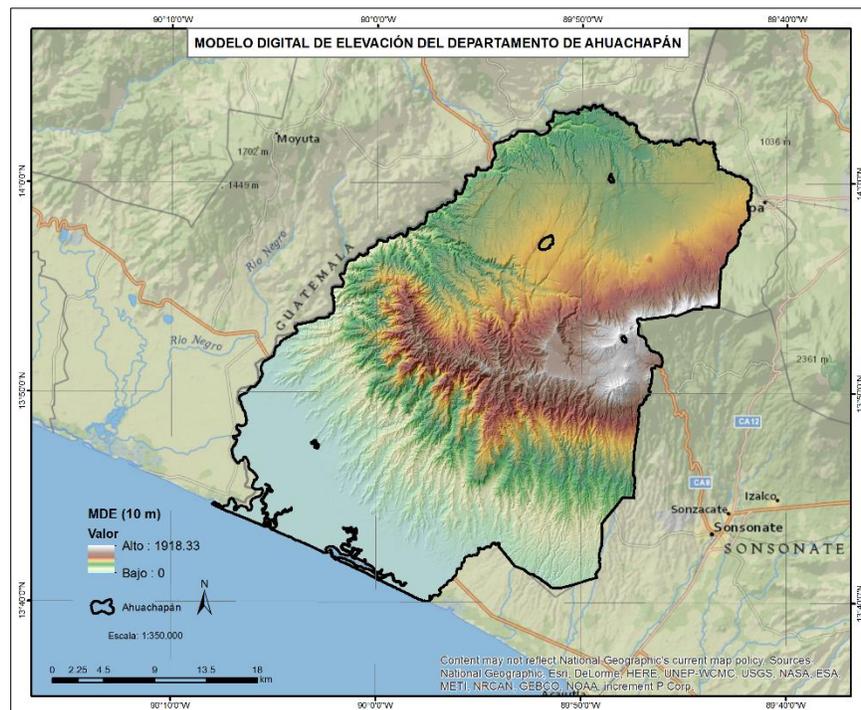


Figura 2. MDE de Ahuachapán

¹ Para mayor información refiérase a <https://fennerschool.anu.edu.au/research/products/anudem>.

² La explicación de cómo este método funciona la puede encontrar en <http://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>.

5.2 Datos climatológicos e hidrométricos

Se obtuvieron datos de estaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH):

- **MARN:** 25 estaciones con series mensuales de precipitación para el país. Huecos presentes en varios años (1981-2012).
- **PNGIRH-MARN:** 10 estaciones con series mensuales de precipitación completadas con valores interpolados para el departamento de Ahuachapán (1965-2012).

La distribución espacial de todas las estaciones de precipitación y la información detallada de éstas se presentan en la Figura 3 y Tabla 2, respectivamente.

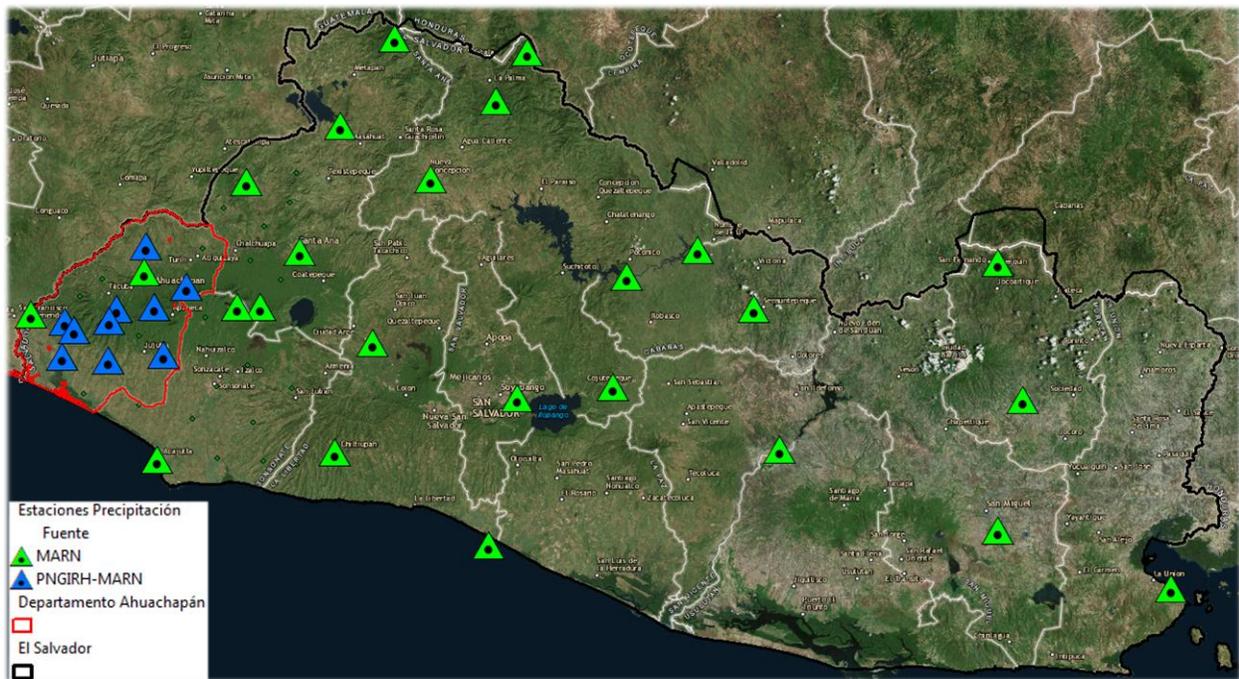


Figura 3. Distribución espacial de estaciones obtenidas con información de precipitación

Tabla 2. Catálogo de estaciones obtenidas con información de precipitación

Cód.	Nombre	Lat.	Long.	Fuente	Depto.	Muni.	Cantón	Altura (msnm)
A-31	Planes de Montecristo	14.39888889	-89.36055556	MARN	Santa Ana	Metapan	El Limo	1862
G-13	Las Pilas	14.37252778	-89.09644444	MARN	Chalatenango	San Ignacio	El Centro	1955
G-04	La Palma	14.27827778	-89.15913889	MARN	Chalatenango	La Palma	San José Sacare	1005

Cód.	Nombre	Lat.	Long.	Fuente	Depto.	Muni.	Cantón	Altura (msnm)
A-15	Güija	14.22838889	-89.46908333	MARN	Santa Ana	Metapan	Belen Guijat	421
G-03	Nueva Concepción	14.12544444	-89.28830556	MARN	Chalatenango	Nueva Concepción	Santa Rosa	318
A-27	Candelaria de la Frontera	14.11930556	-89.65586111	MARN	Santa Ana	Candelaria De La Frontera	Tierra Blanca	726
H10	Caserío El Junquillo	13.9933	-89.8567	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Ahuachapán	Las Chinamas	629.88
A-37	Santa Ana - UNICAES	13.98266667	-89.54925	MARN	Santa Ana	Santa Ana	Ciudad	652
B-01	Chorrera del Guayabo	13.98775	-88.75594444	MARN	Cabañas	Sensuntepeque	La Trinidad	190
Z-03	Perquín	13.96102778	-88.15838889	MARN	Morazán	Perquín	Casa Blanca	1157
H-08	Ahuachapán	13.94311	-89.860083	MARN	Ahuachapán	Ahuachapán	Llano De La Laguna O El Espino	720.576
B-10	Cerrón Grande	13.93422222	-88.89791667	MARN	Cabañas	Jutiapa	Llano Largo	194
H21	Beneficio Buena Vista	13.9133	-89.775	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Ahuachapán	Tacubita	986.807
H23	Ataco, Beneficio El Molino	13.875	-89.84	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Concepción De Ataco	La Ceiba	1206.83
A-18	Finca Los Andes	13.87475	-89.62830556	MARN	Santa Ana	Santa Ana	Potrero Grande Arriba	1745
T-24	Los Naranjos	13.87494444	-89.67411111	MARN	Sonsonate	Juayua	Los Naranjos	1447
H16	Cantón El Nispero	13.87	-89.915	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Tacuba	El Nispero	940.058
B-06	Sensuntepeque	13.87130556	-88.64475	MARN	Cabañas	Guacotecti	Tempisque	642
H-14	La Hachadura	13.85966667	-90.08597222	MARN	Ahuachapán	San Francisco Menéndez	El Jocotillo	35.9011
H15	San Francisco Menéndez	13.845	-90.0167	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	San Francisco Menéndez	El Sacramento	212.002
H24	La Fincona	13.8467	-89.93	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	San Francisco Menéndez	San Benito	875.487
H25	La Fortaleza	13.8283	-89.9983	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	San Francisco Menéndez	El Corozo	250.548
L-04	San Andrés	13.80647222	-89.40377778	MARN	La Libertad	Ciudad Arce	Veracruz	474
H17	San Pedro Puxtla	13.7817	-89.82	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Guaymango	La Esperanza	562.372
H05	Cara Sucia	13.7767	-90.0233	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	San Francisco Menéndez	Cara Sucia	70.5743
H18	San José El Naranjo	13.77	-89.9317	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Jujutla	San José El Naranjo	267.511
C-09	Cojutepeque	13.72058333	-88.92625	MARN	Cuscatlán	Cojutepeque	Los Naranjos	871
Z-02	San Francisco Gotera	13.69225	-88.1085	MARN	Morazán	San Francisco Gotera	Ciudad	242
S-10	Aeropuerto de Ilopango	13.697416	-89.117	MARN	San Salvador	Ilopango	Changallo	615

Cód.	Nombre	Lat.	Long.	Fuente	Depto.	Muni.	Cantón	Altura (msnm)
V-09	Puente Cuscatlán	13.59838889	-88.59430556	MARN	San Vicente	San Vicente	El Rebelde	24
L-27	Chiltiupán	13.59244444	-89.47991667	MARN	La Libertad	Chiltiupan	Santa Lucía	658
T-06	Acajutla Puerto Nuevo	13.5764	-89.8335	MARN	Sonsonate	Acajutla	San Julián	10
M-24	San Miguel - UES	13.43891667	-88.15908333	MARN	San Miguel	San Miguel	El Jute	91
L-08	Santa Tecla SM.	13.412	-89.173	MARN	La Libertad	La Libertad	San Alfredo	0
N-02	La Unión CORSAIN	13.32494444	-87.81472222	MARN	La Unión	La Unión	Amapalita	8

Con la información disponible de precipitación para el departamento, se generó la siguiente figura con el fin de entender el comportamiento climatológico del departamento. Para esto, se graficaron la normal climatológica sugerida por la Organización Meteorológica Mundial (1981-2010) y el promedio multianual para el período 2000-2012. Este último fue el período escogido para llevar a cabo la modelación del balance hídrico, el cual se explica en detalle en el capítulo 6.

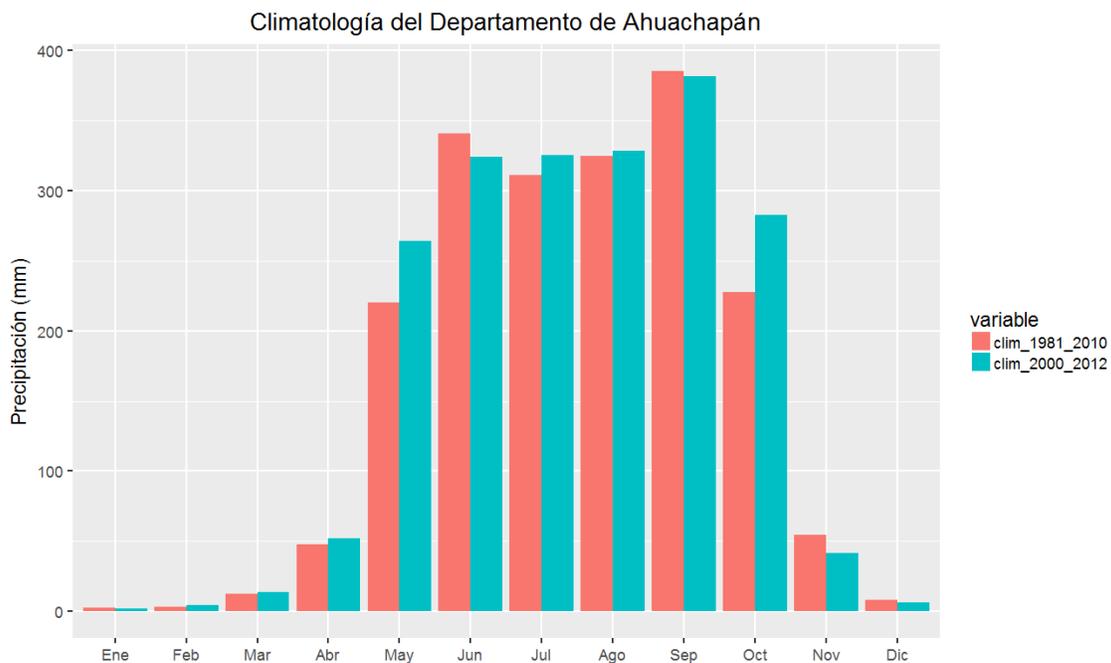


Figura 4. Climatología del departamento de Ahuachapán

Dado que las series de datos de las estaciones del MARN presentaban huecos (ver Tabla 3), se procedió al llenado de los datos faltantes mediante la utilización de las superficies mensuales de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data). Para esto, se extrajeron los datos mensuales de dichas superficies utilizando las coordenadas de las estaciones y se generó un modelo de regresión lineal

para cada estación. Esto permitió predecir los datos faltantes mediante la utilización de ambas series de datos, lo cual reduce las diferencias que se pueden presentar entre ellas. En la Figura 5 se presenta un ejemplo de este proceso.

Tabla 3. Porcentajes de datos faltantes de las estaciones de precipitación del MARN

Código	Estación	Período 1981-2012	
		% Datos Observados	% Datos Faltantes
A-15	Güija	100.0	0.0
A-18	Finca Los Andes	98.2	1.8
A-27	Candelaria de la Frontera	99.5	0.5
A-31	Planes de Montecristo	99.5	0.5
A-37	Santa Ana - UNICAES	100.0	0.0
B-01	Chorrera del Guayabo	99.5	0.5
B-06	Sensuntepeque	99.5	0.5
B-10	Cerrón Grande	98.7	1.3
C-09	Cojutepeque	100.0	0.0
G-03	Nueva Concepción	100.0	0.0
G-04	La Palma	100.0	0.0
G-13	Las Pilas	98.4	1.6
H-08	Ahuachapán	100.0	0.0
H-14	La Hachadura	99.7	0.3
L-04	San Andres	99.5	0.5
T-06	Acajutla Puerto Nuevo	99.7	0.3
T-24	Los Naranjos	100.0	0.0
V-09	Puente Cuscatlán	99.7	0.3
Z-02	San Francisco Gotera	99.7	0.3
Z-03	Perquín	64.8	35.2
L-08	Santa Tecla SM.	65.4	34.6
L-27	Chiltiupán	98.2	1.8
M-24	San Miguel - UES	100.0	0.0
N-02	La Unión CORSAIN	100.0	0.0
S-10	Aeropuerto de Ilopango	99.7	0.3

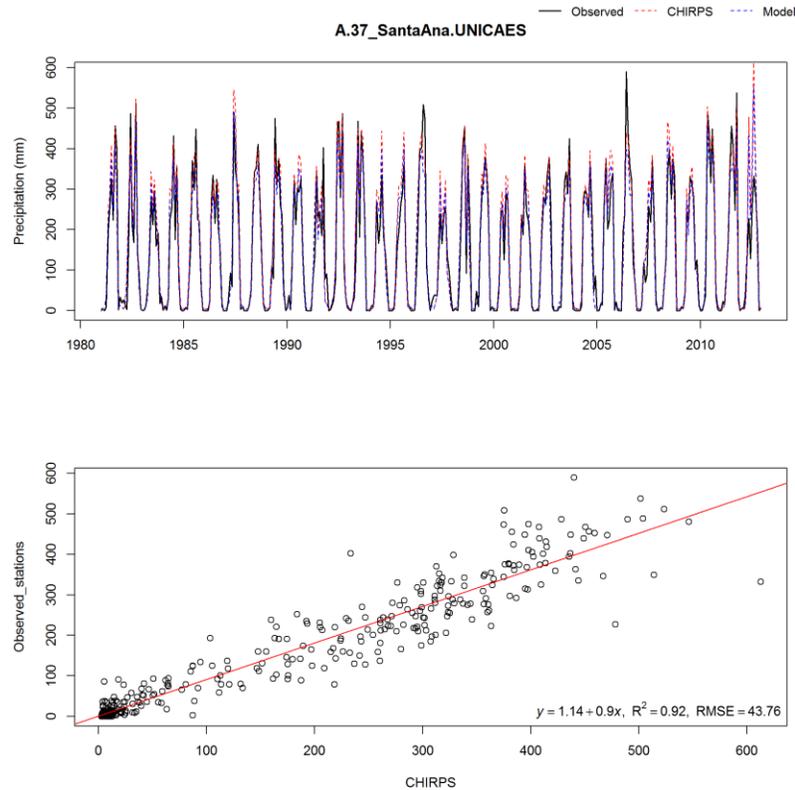


Figura 5. Ejemplo del llenado de datos faltantes de una estación climatológica

5.2.1 Interpolación de datos de precipitación

Dado que el balance hídrico implementado en esta evaluación hidrológica es espacial, es decir, distribuido sobre el territorio, se necesitan tener superficies continuas de las variables de entrada. Por esta razón, se tuvieron que generar superficies mensuales de precipitación para el período de modelación. Este proceso se llevó a cabo utilizando el método ANUSPLIN³ versión 4.4, el cual utiliza “thin-plate smoothing splines” para la interpolación de datos multivariados ruidosos. Este método ha sido utilizado ampliamente a nivel mundial, por ejemplo, este fue el método utilizado para generar las superficies climáticas globales de *WorldClim* (<http://www.worldclim.org/methods1>).

Debido a que la distribución de las estaciones de precipitación dentro y alrededor del departamento no es muy densa, se crearon pseudo-estaciones las cuales contienen series completas de datos de precipitación de CHIRPS para localizaciones específicas en una región de interpolación (puntos negros en Figura 6). En la siguiente imagen se pueden apreciar la región de interpolación y las estaciones finales a ser utilizadas para este proceso:

³ Para mayor información refiérase a <https://fennerschool.anu.edu.au/research/products/anudem>.

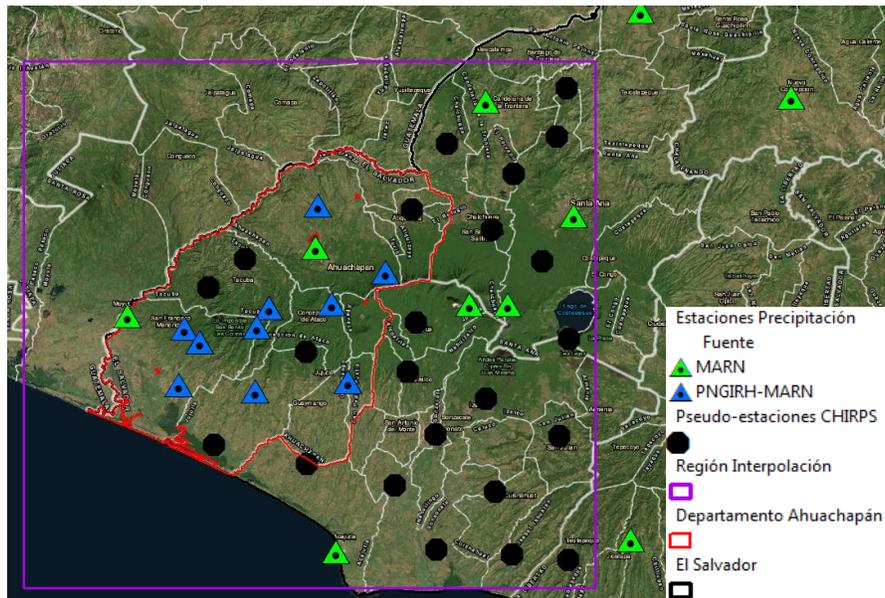


Figura 6. Estaciones utilizadas para la interpolación de datos de precipitación

Es importante mencionar que la interpolación realizada es de tercer orden, la cual utiliza como co-variable la altitud basada en el MDE (ver sección 5.1). Las superficies mensuales resultantes para el período 2000-2012 tienen una resolución espacial de 1 km y fueron promediadas a nivel multianual con el fin de visualizar el comportamiento de los 12 meses del año:

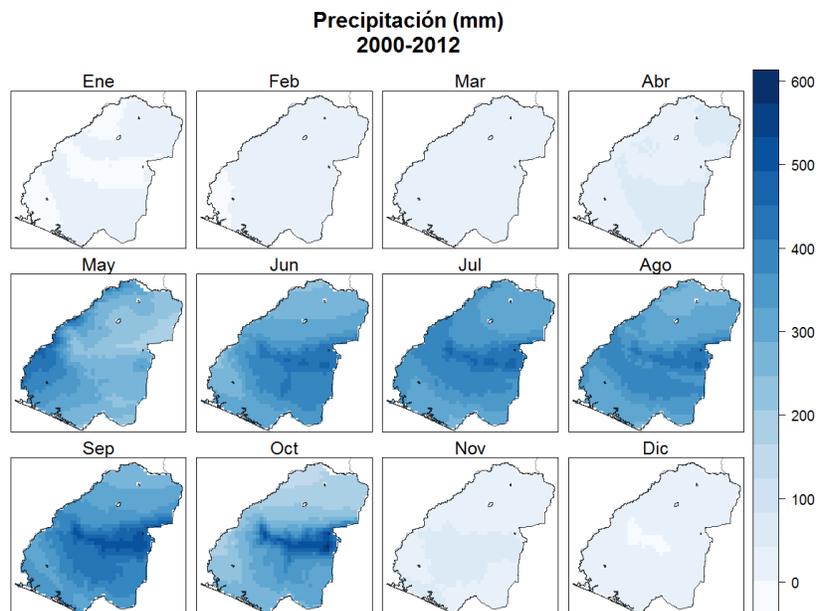


Figura 7. Precipitación mensual interpolada (1 km)

Es importante notar que el comportamiento climatológico del departamento así como la distribución espacial de la lluvia, ambos representados en la figura anterior, son coherentes y están correlacionados con el comportamiento que se aprecia en la Figura 4.

5.2.1 Evapotranspiración potencial

Sólo dos estaciones presentaban datos de evapotranspiración potencial (H-08 y H-14, ver Tabla 2), lo que imposibilitaba llevar a cabo alguna interpolación para todo el departamento, pues las superficies resultantes no representarían adecuadamente el comportamiento de esta variable. Dado lo anterior, se procedió a utilizar las superficies globales de MODIS (MOD16) las cuales tienen resolución espacial de 1 km (Mu et al., 2013; Willem Vervoort et al., 2014). El período disponible de este conjunto de datos es desde el año 2000 hasta el 2014 y el método para la generación de las superficies es el de Penman-Monteith, uno de los métodos más ampliamente utilizado en el mundo (Allen et al., 1998; Neitsch et al., 2011; Ulmen, 2000a). Estas superficies fueron descargadas en formato HDF, convertidas a formato GeoTIFF y cortadas con el límite del departamento. A continuación se presenta la evapotranspiración potencial para el departamento de Ahuachapán para los 12 meses del año:

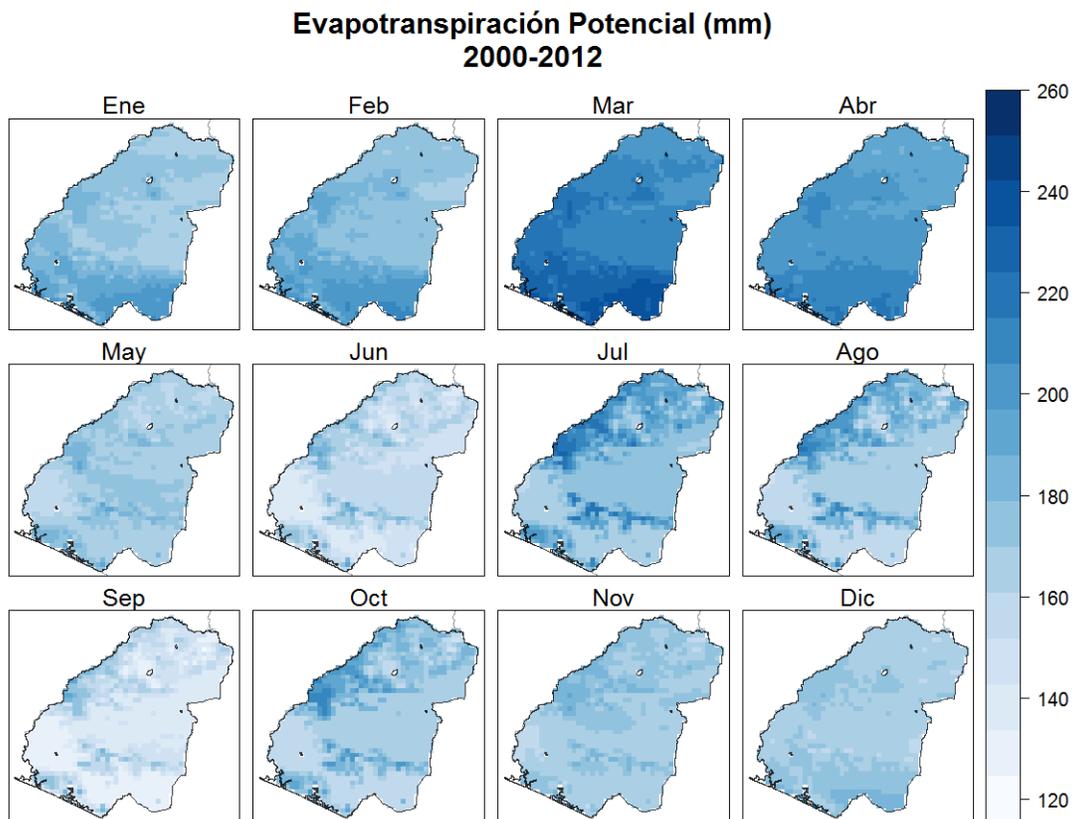


Figura 8. Evapotranspiración potencial (1 km)

5.2.2 Análisis de datos de caudal

También fueron suministrados datos de caudal de dos estaciones hidrométricas y algunos aforos puntuales en diferentes sitios del río Cara Sucia. Dado esto, sólo se utilizaron los datos de las estaciones hidrométricas, las cuales son detalladas a continuación:

Tabla 4. Catálogo de estaciones obtenidas con información de caudales

Cód.	Nombre	Lat.	Long.	Fuente	Depto.	Muni.	Cantón
HC-00	La Hachadura	13.860499	-90.088031	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	San Francisco Menendez	El Jocotillo
HC-01	El Jobo	14.017078	-89.907297	PNGIRH-MARN	Ahuachapán	Ahuachapán	Santa Cruz

Ambas estaciones contaban con registros mensuales de caudales. La estación HC-00 contaba con datos para el período 1962-2010, mientras que la estación HC-01 con datos para los años 2002-2010, 2012. Estas dos estaciones se encuentran sobre el río Paz (estando la estación HC-01 ubicada aguas arriba de HC-00), el cual sirve como límite internacional entre El Salvador y Guatemala. Es importante mencionar que dado las localizaciones de las dos estaciones, los caudales reportados reflejan flujos acumulados de áreas de drenaje que involucran territorios de ambos países colindantes, limitando de esta manera cualquier tipo de calibración del balance hídrico. En la siguiente figura se pueden apreciar las series de caudal de ambas estaciones para el período 2000-2012:

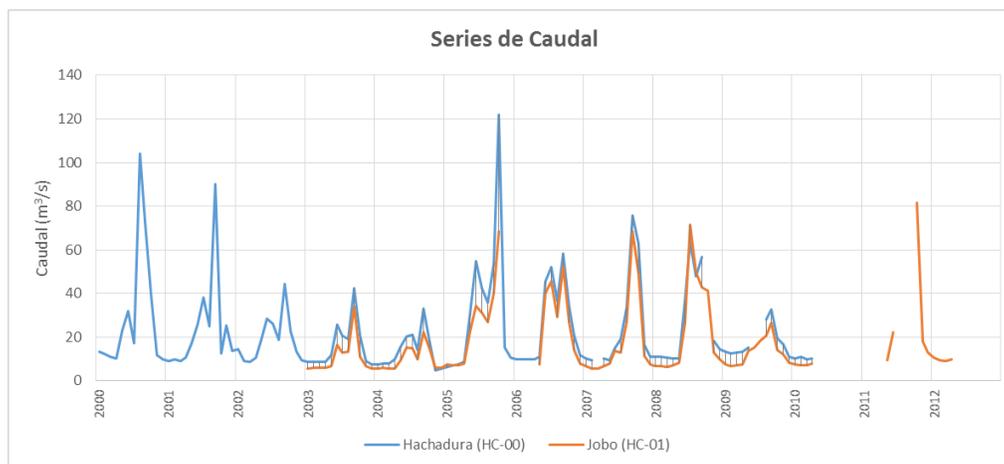


Figura 9. Series de caudal de las estaciones hidrométricas

Como se puede apreciar en la anterior figura, la serie de la estación HC-00 es la más completa presentando, al igual que HC-01, huecos principalmente en los últimos años.

5.3 Coberturas/Usos del suelo

El departamento de Ahuachapán presenta 32 clases de coberturas/ usos del suelo al 2012 de acuerdo a la clasificación Corine Land Cover. A estas clases se les asoció información relevante para el balance hídrico (ver Tabla 5), lo cual será explicado en detalle en el capítulo 6. La distribución espacial de estas coberturas puede apreciarse en la Figura 10. Como se dijo anteriormente, en el departamento predominan los Granos Básicos, Café, Cultivos Anuales Asociados con Cultivos Permanentes y Mosaico de Cultivos y Pastos.

Tabla 5. Números de curva (CN2) de acuerdo a cada grupo hidrológico y coeficiente de cultivo (kc)

Cód. *	Legenda	CN2_A	CN2_B	CN2_C	CN2_D	kc*1000	Área (ha)	Área (%)
124	Aeropuertos	31	59	72	79	300	9.653943	0.01
2234	Árboles Frutales	43	65	76	82	966	31.76372	0.03
125	Áreas Turísticas y Arqueológicas	39	61	74	80	398	20.61929	0.02
3111	Bosque Caducifolios	36	60	73	79	1000	2221.888	1.88
314	Bosque de Mangle	45	66	77	83	1200	1840.573	1.56
3112	Bosque Siempre Verdes	30	55	70	77	1000	6483.707	5.50
316	Bosques de Galería (a orillas de ríos y quebradas)	30	55	70	77	1000	1763.328	1.50
2221	Café	45	66	77	83	1100	28434.9	24.11
2241	Caña de Azúcar	25	35	70	79	1045	6469.322	5.49
241	Cultivos Anuales Asociados con Cultivos Permanentes	67	78	85	89	650	10684.14	9.06
211	Granos Básicos	63	75	83	87	1200	28464.68	24.14
512	Instalaciones Deportivas y Recreativas	49	69	79	84	300	0.002426	0.00
512	Lagos, lagunas y lagunetas de agua dulce	80	80	80	80	1050	149.8346	0.13
521	Lagunas costeras y esteros	80	80	80	80	1050	127.9312	0.11
242	Mosaico de Cultivos y Pastos	63	73	80	83	850	7761.895	6.58
2231	Palmeras Oleíferas	45	66	77	83	1000	185.5977	0.16
231	Pastos Cultivados	39	61	74	80	865	4125.982	3.50
232	Pastos Naturales	68	79	86	89	925	6708.564	5.69
315	Plantaciones de bosques monoespecíficos	25	45	70	77	1000	618.811	0.52
2211	Plataneras y Bananeras	45	66	77	83	1150	1619.326	1.37
331	Playas, dunas y arenales	75	83	87	89	1200	19.15668	0.02
412	Praderas Pantanosas	49	69	79	84	1200	146.7316	0.12
511	Ríos	80	80	80	80	1050	160.7554	0.14
332	Rociedad, lavas	31	59	72	79	300	43.09048	0.04
422	Salinerías	80	80	80	80	1200	18.42797	0.02
111	Tejido Urbano Continuo	31	59	72	79	300	1034.704	0.88
112	Tejido Urbano Discontinuo	31	59	72	79	300	3145.523	2.67
243	Terrenos principalmente agrícola, pero con importante espacios de vegetación natural	26	35	45	60	650	4823.1	4.09
322	Vegetación Arbustiva Baja	40	45	50	55	925	728.1855	0.62
321	Vegetación Herbácea Natural	63	71	81	89	925	33.56197	0.03
121	Zonas Comerciales o Industriales	31	59	72	79	300	16.97263	0.01
133	Zonas en Construcción	77	86	91	94	300	28.343	0.02
							117921.1	100.00

* Código según clasificación Corine Land Cover

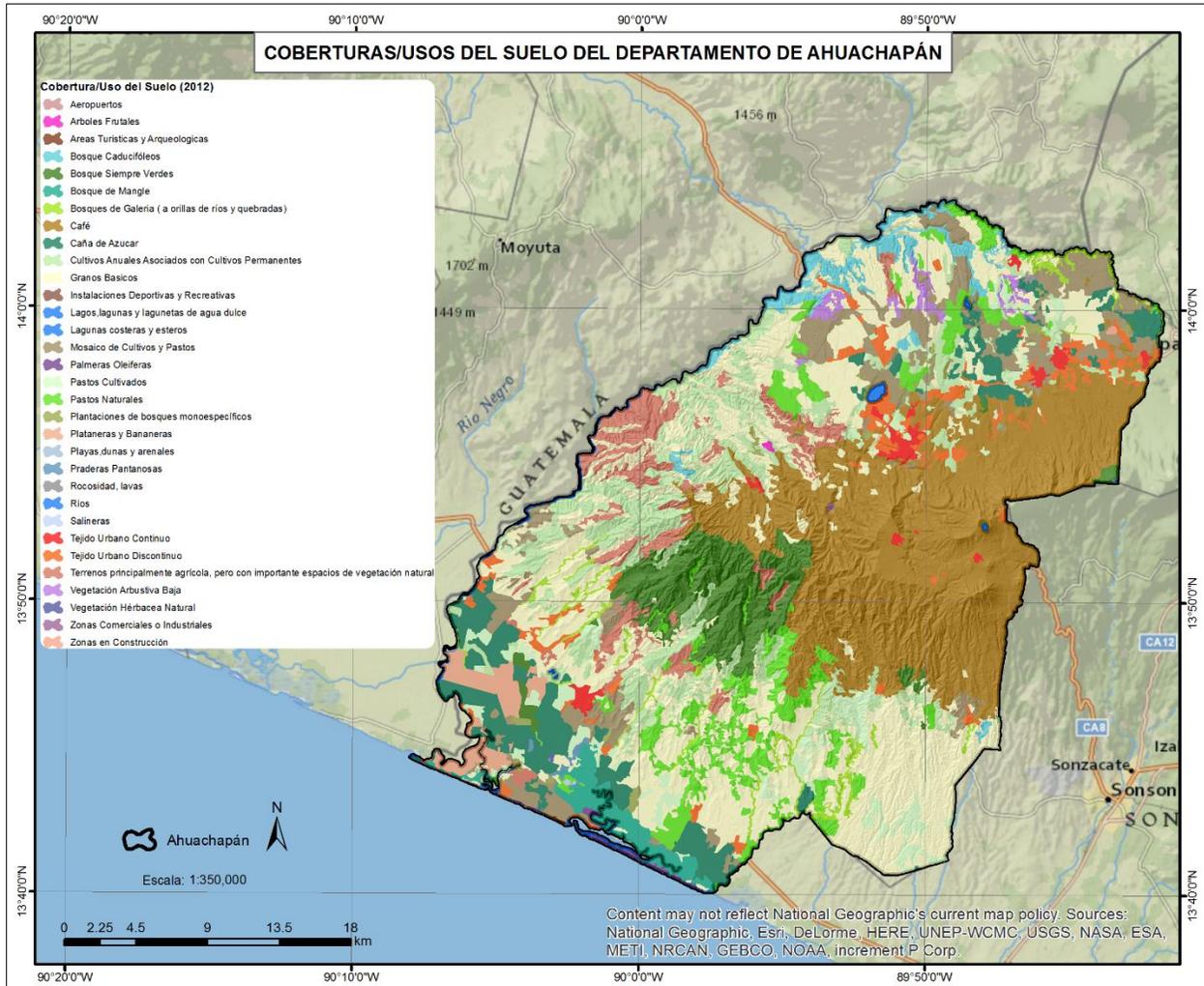


Figura 10. Coberturas/Usos del suelo del departamento de Ahuachapán

5.1 Suelos y sus derivados

A partir del Mapeo Digital de Suelos se obtuvieron múltiples variables las cuales fueron utilizadas para la modelación del balance hídrico. Entre estas variables está la textura del suelo (arena, limos y arcilla) -de la cual a su vez se puede derivar el grupo hidrológico (A, B, C o D)-, la capacidad de campo (CC) y el punto marchitez permanente (PMP). A partir de estas dos últimas variables y utilizando la profundidad efectiva del suelo, se puede generar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. En la siguiente figura se presentan las seis variables más importantes o que fueron utilizadas directamente en la modelación del balance hídrico:

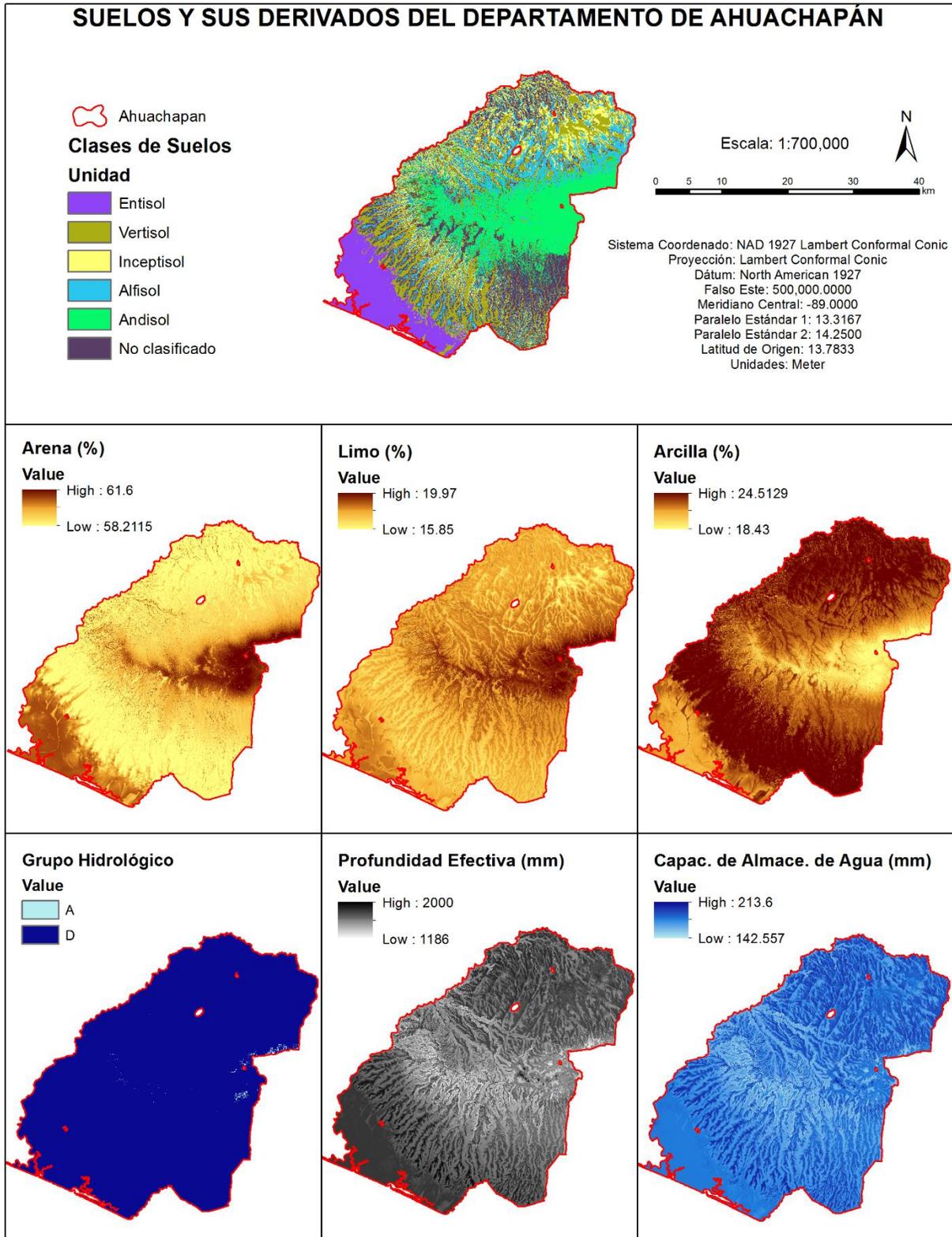


Figura 11. Suelos y sus derivados del departamento de Ahuachapán

6. Determinación del Balance Hídrico

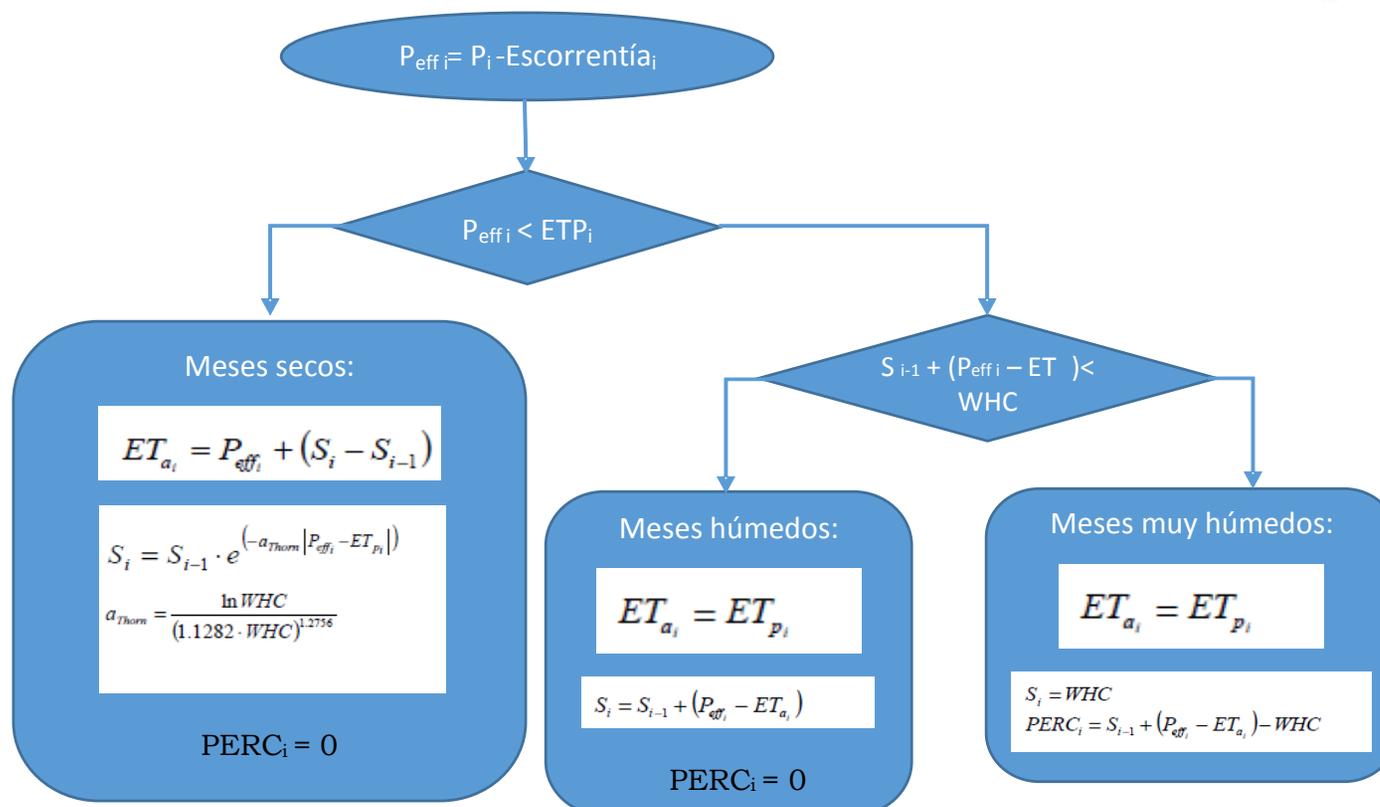
El conocimiento del balance hídrico en una zona geográfica es de vital importancia para entender y anticipar las acciones necesarias que aseguren la sostenibilidad de cualquier sistema agropecuario, y a su vez que permitan la conservación y restauración de los ecosistemas presentes, especialmente aquellos relacionados con los recursos hídricos. En este estudio, se utilizó uno de los esquemas de balance hídrico más ampliamente usado a nivel mundial, como es 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 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 potencial y real). Por estas razones, ha sido usado como base para la estimación de los requerimientos hídricos de diversos sectores como el agrícola (Ferguson, 2009; Hoogeveen et al., 2015; Ulmen, 2000b; Westenbroek et al., 2010).

En la Figura 12 se puede observar el esquema 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 Figura 12, donde la disminución de la humedad del suelo y la evapotranspiración real 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 del suelo, 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 real. 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.



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 12. Esquema de balance hídrico de Thornthwaite and Mather usado para la evaluación hidrológica mensual

Este balance fue calculado pixel a pixel a nivel mensual desde el 2000 hasta el 2012 para todo el departamento de Ahuachapán. Este período fue escogido teniendo en cuenta la disponibilidad de datos de evapotranspiración potencial de MODIS (2000-2014) y de precipitación de las estaciones climatológicas (1981-2012). Por su parte, el mes de inicio (octubre) fue estimado como el mes posterior al de mayor humedad del suelo (septiembre, ver Figura 7), es decir, el mes posterior al que para la mayoría de píxeles 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 la zona de estudio fue igual a la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Una parte esencial del modelamiento del balance hídrico es el cálculo de la constante de recesión (k), la cual se define como el exponencial (e^x) de la constante de deflexión (α) y es la que representa en el modelo el comportamiento del flujo base (Krahe et al., 1997; Neitsch et al., 2011; Thomas et al., 2013). Dicha constante está implícitamente relacionada con los flujos de los drenajes en la época seca, la cual para la zona de estudio va desde Diciembre hasta Marzo (Figura 4). Sin embargo, para la determinación de esta constante se utilizaron los datos de caudal desde Noviembre; dado que es a partir de este mes que los flujos en los canales de la red hídrica empiezan a reducirse de manera exponencial. Siguiendo los enfoques de Fish (2011) y Ulmen (2000a) y a partir de las siguientes dos gráficas, se pudieron encontrar las dos curvas exponenciales que mejor se ajustaban a las series de datos de caudal de ambas estaciones, permitiendo de esta manera primero determinar las constantes de deflexión y posteriormente las constantes de recesión.

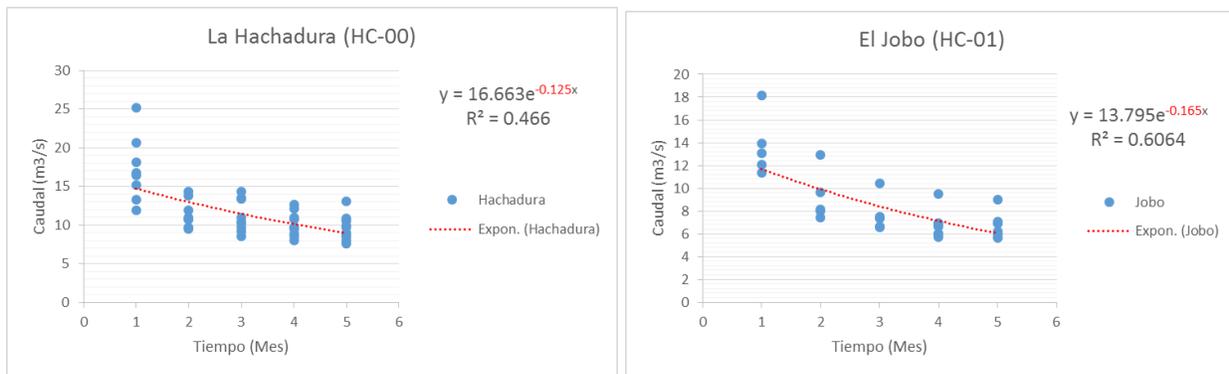


Figura 13. Determinación de la constante de deflexión (α) con datos de la estación HC-00 (izquierda) y HC-01 (derecha)

A partir de los valores resaltados en color rojo en la figura anterior, se procedió a realizar los correspondientes cálculos de la constante de recesión y se determinó para el balance hídrico el valor **0.87**. Los cálculos se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 6. Cálculo de la constante de recesión (k)

Estación	Constante Deflexión (α)	R ²	Constante Recesión (k)	Comentario
La Hachadura	-0.125	0.47	0.88	Contiene a Jobo
El Jobo	-0.165	0.61	0.85	
Promedio	-0.145	0.54	0.87	

Posteriormente, siguiendo el enfoque de Thornthwaite et al. (1957), citado en Ulmen (2000a), se puede determinar el flujo base para un mes determinado en dependencia del flujo base del mes anterior y la percolación del mes actual, de la siguiente manera:

$$FB_i = k \cdot FB_{i-1} + (1 - k) \cdot PERC_i$$

Donde:

FB_i : Flujo base en el mes i (mm/mes)

k : Constante de recesión (adimensional)

FB_{i-1} : Flujo base en el mes $i-1$ (mm/mes)

$PERC_i$: Percolación en el mes i (mm/mes)

Finalmente es posible determinar el aporte de agua al caudal como la sumatoria de la escorrentía y el flujo base. Esta variable es la que finalmente puede ser convertida en flujo mediante el uso de la correspondiente área de drenaje y teniendo en cuenta la temporalidad de la modelación, la cual para este caso de estudio es mensual. Por lo tanto, este flujo podría ser comparado con datos de estaciones hidrométricas pero desafortunadamente y como ya fue mencionado (ver sección 5.2.2), para este caso de estudio no se pudo llevar a cabo un proceso de calibración debido a las ubicaciones de las estaciones y sus correspondientes áreas de drenaje.

6.1 Estimación de la escorrentía superficial

Uno de los componentes de mayor importancia en el balance hídrico 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 (CN, por sus siglas en Inglés), la cual relaciona la cantidad de precipitación generada en una tormenta con la escorrentía generada de acuerdo al tipo de suelo, cobertura vegetal y 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. Así, el procedimiento para definir el mapa de números de curva en la zona de estudio siguió tres pasos. El primero fue relacionar los números de curva a cada clase de cobertura vegetal basándose en múltiples estudios (Arnold et al., 1993; Arnold & Fohrer, 2005; Cronshey, 1986; Gassman et al., 2007; Neitsch et al., 2011). El segundo fue definir el grupo hidrológico del suelo por pixel de acuerdo a la textura y demás variables de suelos descritas en el estudio de MDS. El tercero fue generar una superficie de números de curva para la zona 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 5), es decir, para la condición en que la lluvia antecedente total de cinco días⁴ 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 la zona 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 cada una de estas superficies fueron ajustadas utilizando la pendiente generada a partir del MDE (Figura 2) y siguiendo los procedimientos planteados en la fuente citada anteriormente.

Debido a que en esta evaluación hidrológica sólo se contó con información a nivel mensual, fue necesario usar la adaptación realizada por Ferguson (1996) en la que se relaciona 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 números de curva, el máximo potencial de retención (S) y precipitaciones (P) en el mismo período de tiempo, se podía calibrar la estimación de escorrentía (Q) a nivel mensual.

La siguiente ecuación es la definida por Ferguson (1996) utilizando los datos de todas las estaciones en su caso de estudio y que fue implementada en la presente evaluación hidrológica:

$$Q = -0.095 + 0.208 \cdot P/S^{0.66}$$

Donde:

Q: Escorrentía (pulgadas/mes)

P: Precipitación (pulgadas/mes)

S: Máximo potencial de retención (pulgadas/mes)

⁴ Para esto se utilizaron las capas de precipitación de CHIRPS de los últimos cinco días de cada mes (pentadiarias).

Dado las unidades de salida de la variable Q, es necesario convertirla posteriormente a milímetros para los cálculos correspondientes en el balance. 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 14 se puede observar el mapa de escorrentía superficial a nivel mensual para el departamento de Ahuachapán, siendo ésta más alta especialmente entre los meses de Junio a Octubre teniendo valores que llegan hasta los 300 mm/mes. Este mapa fue usado como insumo para la generación del balance hídrico y será una variable de alta importancia para la identificación de sitios potenciales de cosecha de agua lluvia que se llevará a cabo más adelante durante la iniciativa Raíces-Ahuachapán.

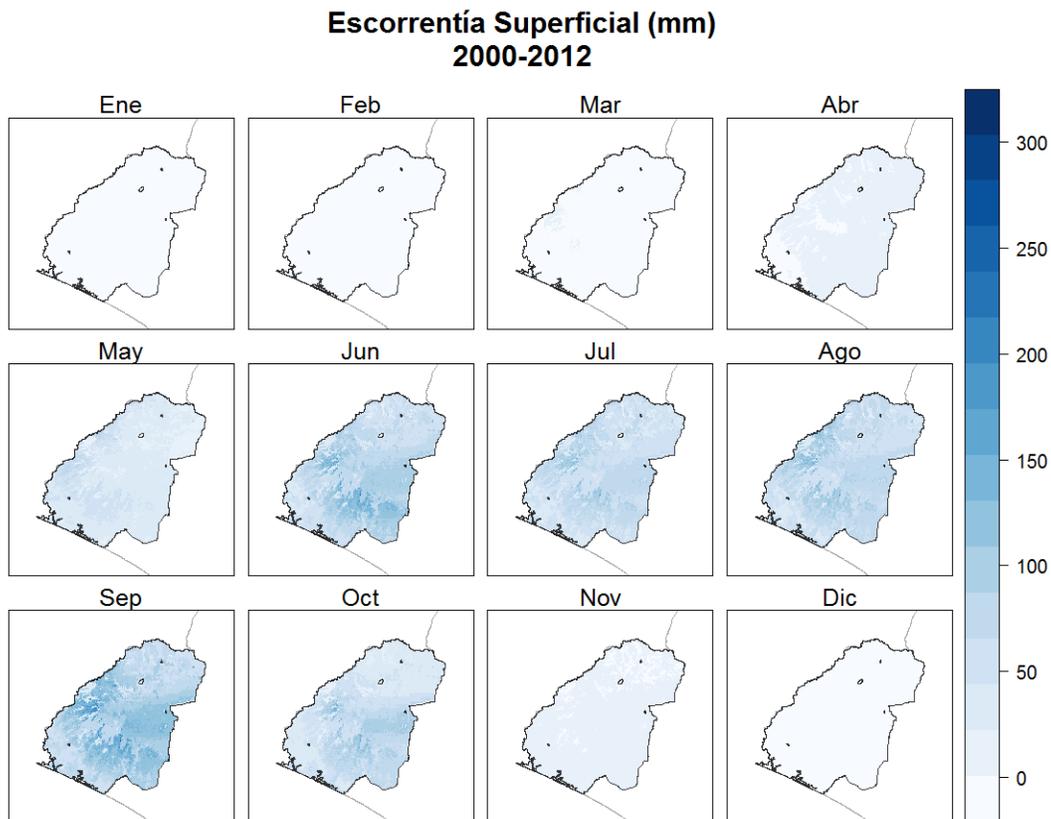


Figura 14. Escorrentía superficial a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

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

Para cada mes desde el 2000 hasta el 2012 fue calculado el balance hídrico a nivel mensual y luego se realizó un promedio mensual multianual, el cual será usado para posteriores análisis en la iniciativa. Las dos variables más importantes de entrada del balance mensual fueron las superficies de precipitación de

CHIRPS y la evapotranspiración potencial de MODIS para el mismo periodo obtenido. Las anteriores variables junto a los mapas de números de curva descritos anteriormente y de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, fueron las entradas directas para el cálculo del balance hídrico.

Siguiendo el esquema de la Figura 12 y con la esorrentía calculada por el enfoque de Ferguson (1996), se estimaron las variables de precipitación efectiva, almacenamiento de agua en el suelo, evapotranspiración real, percolación, flujo base y aporte de agua al caudal. Es importante mencionar que para el cálculo de la evapotranspiración real, se utilizaron las capas de evapotranspiración potencial de MODIS y los valores del coeficiente de cultivo (kc) los cuales fueron asociados a las clases de coberturas/ usos del suelo (ver Tabla 5). Los valores utilizados fueron tomados de dos estudios principalmente: Allen et al. (1998) y Sharp et al. (2018). Este coeficiente incorpora características del cultivo, en este caso coberturas vegetales, y efectos promedios de evaporación del suelo.

Los mapas resultantes del balance hídrico y que se presentan a continuación, serán los insumos para la identificación de áreas claves en la contribución de agua al caudal en el departamento de Ahuachapán.

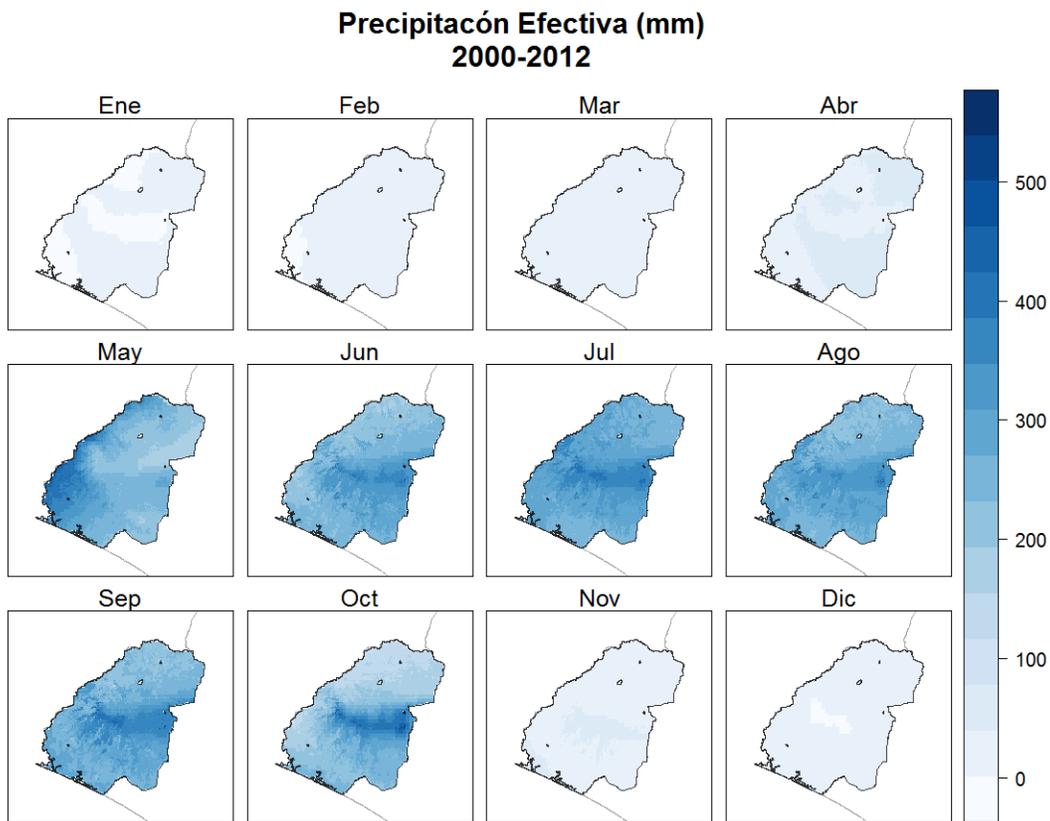


Figura 15. Precipitación efectiva a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

**Almacenamiento de Agua en el Suelo (mm)
 2000-2012**

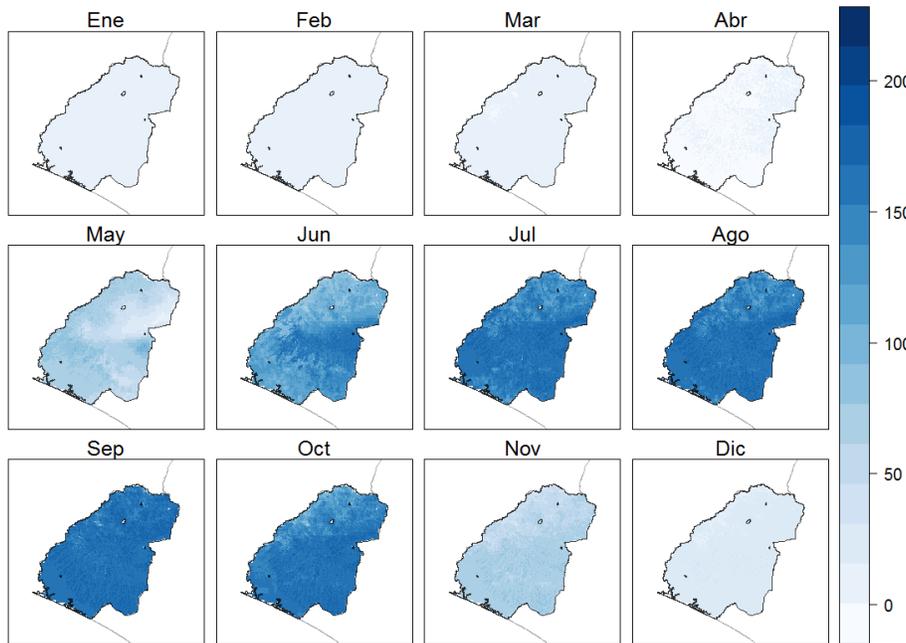


Figura 16. Almacenamiento de agua en el suelo a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

**Evapotranspiración Real (mm)
 2000-2012**

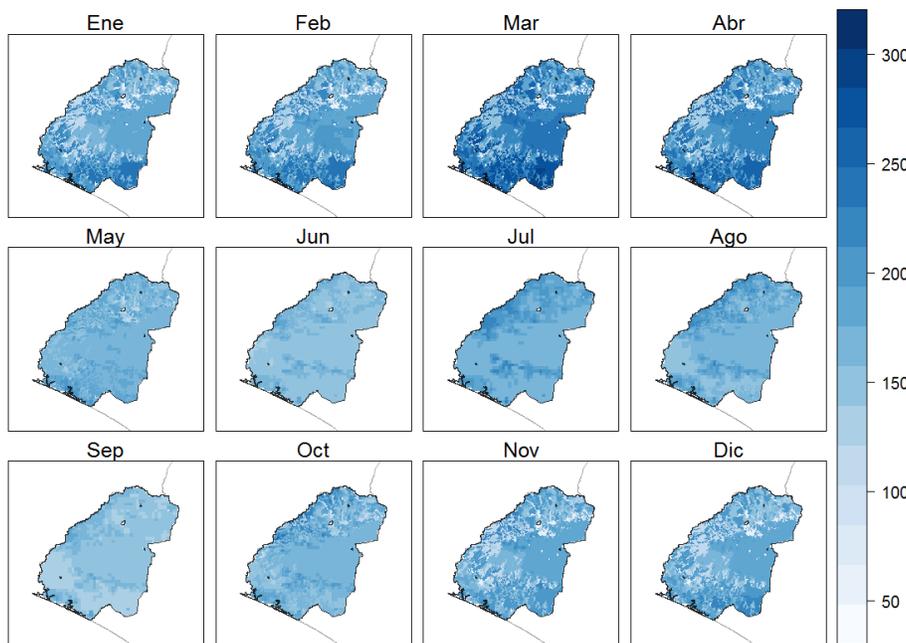


Figura 17. Evapotranspiración real a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

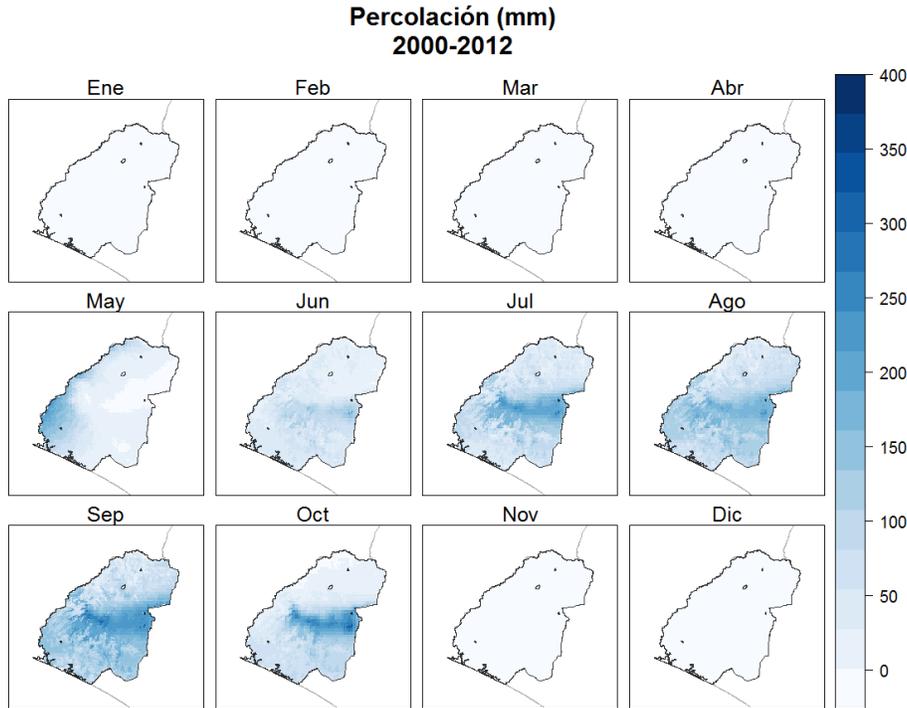


Figura 18. Percolación a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

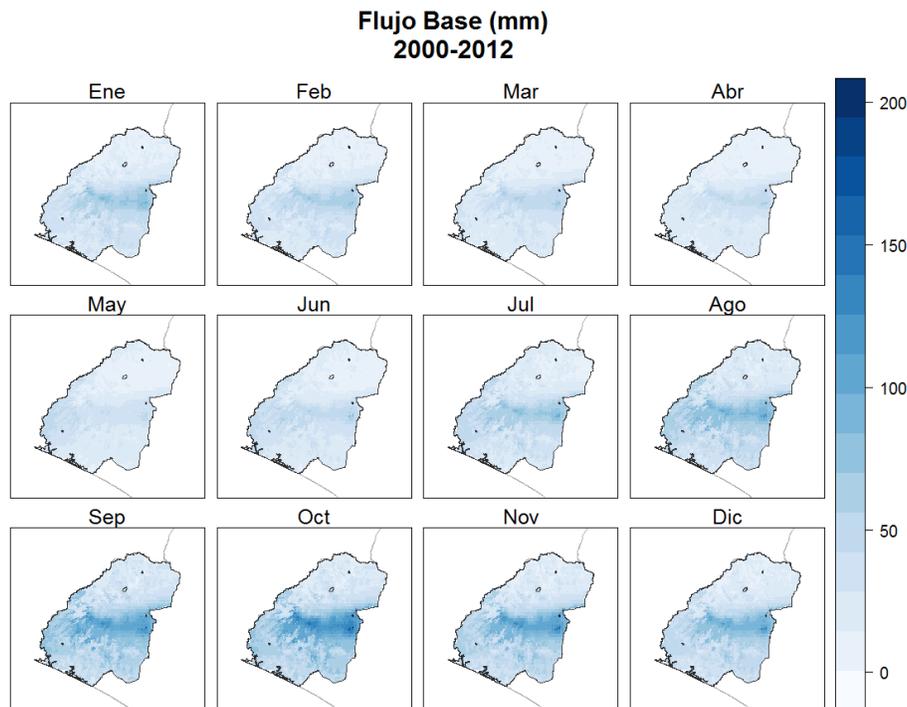


Figura 19. Flujo base a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

**Aporte de Agua (mm)
2000-2012**

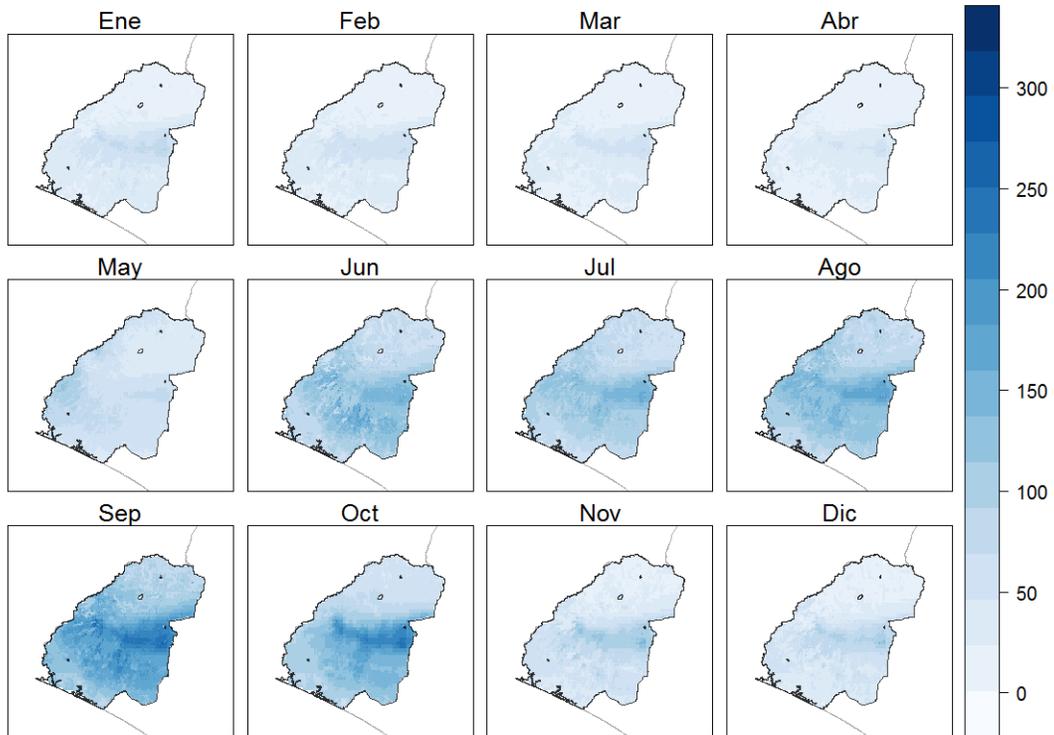


Figura 20. Aporte de agua al caudal a nivel mensual entre los años 2000 y 2012

7. Implicaciones para la Iniciativa

Los resultados obtenidos a través de la evaluación hidrológica superficial del departamento de Ahuachapán, pueden ser utilizados en conjunto con los resultados de la modelación de agua subterránea. Estas sinergias identificadas permiten potencializar la priorización de áreas para la intervención de la iniciativa. En la siguiente figura se presenta un esquema de las posibles sinergias identificadas entre ambos enfoques:

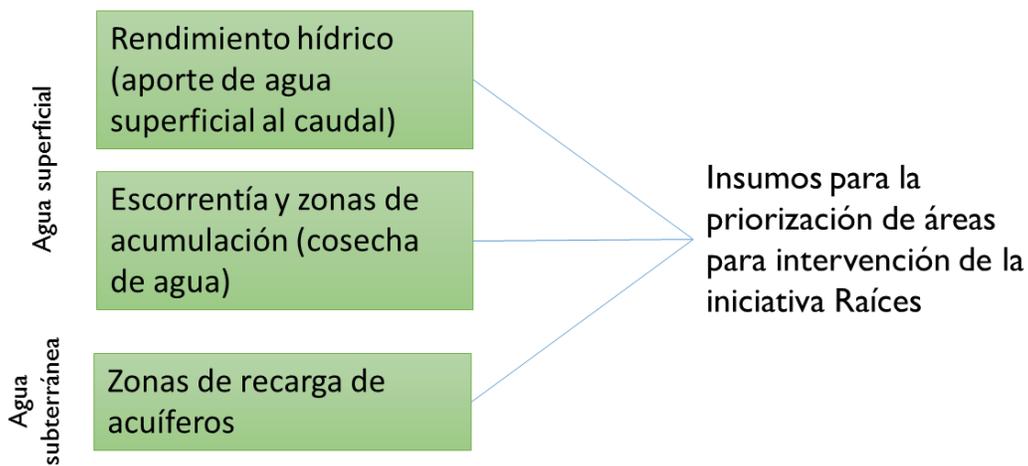


Figura 21. Esquema de sinergias entre los enfoques de evaluación hidrológica

Es importante resaltar que aquellas zonas que son importantes por aporte de agua superficial al caudal (y para cosecha de agua) no necesariamente son las mismas áreas de importancia para recarga de acuíferos, por lo tanto, Raíces-Ahuachapán debe tener una priorización diferenciada, es decir, que atienda una estrategia integral de manejo del recurso hídrico, y de acuerdo a lo que es más relevante en la zona a ser intervenida.

Por parte de los resultados obtenidos en la presente evaluación hidrológica y utilizando principalmente los mapas de aporte de agua al caudal (Figura 20), se puede lograr una identificación de áreas claves en la contribución de agua superficial tanto en época seca como de lluvia. Además, el balance hídrico es un insumo de alta relevancia para la identificación de zonas con potencial de cosecha de agua lluvia, es decir, zonas que por sus condiciones naturales permitan captar el agua de escorrentía efectivamente como suministro para sistemas de riego de pequeños agricultores o acueductos locales.

8. Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome, Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm#Contents>
- Arnold, J. G., Allen, P. M., & Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142(1–4), 47–69. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90004-S](http://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90004-S)
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572. <http://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Cronshey, R. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55. U.S. Dept. of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, 164. Retrieved from https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Ferguson, B. K. (2009). Estimation of Direct Runoff in the Thornthwaite Water Balance Estimation of Direct Runoff in the Thornthwaite Water Balance ". *Professional Geographer*, 48(789296666), 263–271. <http://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1996.00263.x>
- Fish, R. E. (2011). *Using water balance models to approximate the effects of climate change on spring catchment discharge: Mt. Hanang, Tanzania (Master's thesis)*. Michigan Technological University.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). *The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions* (No. 443). Ames, USA. Retrieved from http://publications.iowa.gov/5419/1/paper_12744.pdf
- Hoogeveen, J., Faurès, J.-M., Peiser, L., Burke, J., & van de Giesen, N. (2015). GlobWat – a global water balance model to assess water use in irrigated agriculture. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(1), 801–838. <http://doi.org/10.5194/hessd-12-801-2015>
- Krahe, P., Daamen, K., Mulders, R., & Wilke, K. (1997). GIS-related baseflow simulation for water balance and precipitation-runoff modelling in the River Rhine basin. In M. F. Baumgartner, G. A. Schultz, & A. I. Johnson (Eds.), *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems* (pp. 157–164). Rabat, Morocco: IAHS Publ. no. 242.
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2013). MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3). *Algorithm Theoretical Basis Document, Collection, 5*.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. College Station, USA. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- 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))
- Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J.,

- Cameron, D., Arkema, K., & Lonsdorf, E., K, J. (2018). InVEST +VERSION+ User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. Retrieved from <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/index.html>
- 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>
- Thomas, B. F., Vogel, R. M., Kroll, C. N., & Famiglietti, J. S. (2013). Estimation of the base flow recession constant under human interference. *Water Resources Research*, 49(11), 7366–7379. <http://doi.org/10.1002/wrcr.20532>
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). The water balance. *Publications in Climatology*, 8(1).
- Thornthwaite, C. W., Mather, J. R., Carter, D. B., & Drexel Institute of Technology. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Centerton, N.J.: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.
- Ulmen, C. (2000a). *Modelling raster-based monthly water balance components for Europe*. Koblenz, Germany.
- Ulmen, C. (2000b). *Report No. 26 Modelling raster-based monthly water balance components for Europe. GRDC No. 26*.
- 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.
- Willem Vervoort, R., Miechels, S. F., van Ogtrop, F. F., & Guillaume, J. H. A. (2014). Remotely sensed evapotranspiration to calibrate a lumped conceptual model: Pitfalls and opportunities. *Journal of Hydrology*, 519, 3223–3236. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.034>
- 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)