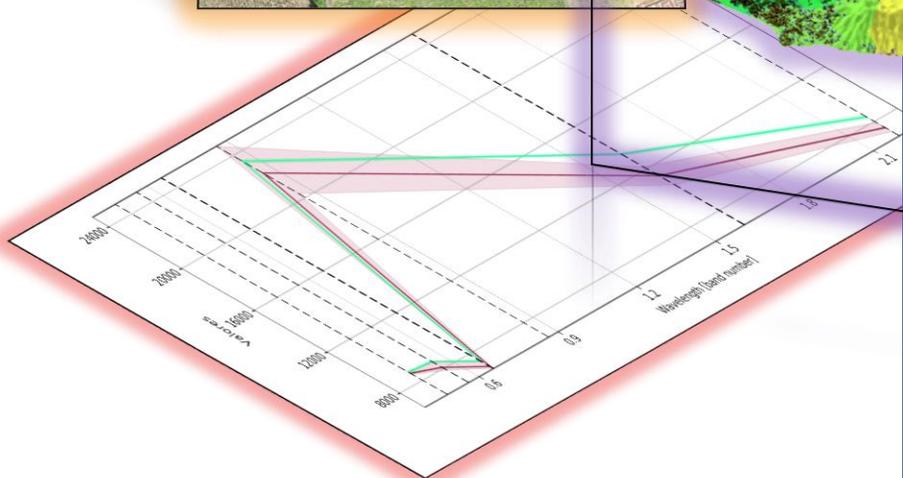
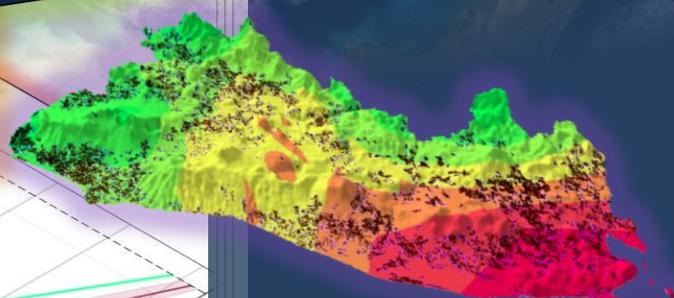


AÑO: 2019

**Estimación geoespacial de efectos por
variación de precipitación en la
producción de granos básicos,
Zona Central de El Salvador 2013-2018**



**ESTIMACIÓN GEOESPACIAL DE EFECTOS POR
VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN EN LA
PRODUCCIÓN DE GRANOS BÁSICOS
ZONA CENTRAL DE EL SALVADOR 2013 – 2018**

AÑO: 2019

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL



UNIVERSIDAD DOCTOR ANDRÉS BELLO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL
ÁREA TECNOLOGÍA

©2019, Universidad Doctor Andrés Bello

Primera edición 2020

Publicación correspondiente a la investigación realizada en la Sede Universitaria de San Salvador, derivada de la monografía con registro ISBN 978-99961-65-26-9.

La reproducción total o parcial del documento está permitida, solo deberá citarse de forma apropiada la fuente.¹

Código Institucional: **SS/INV/H/2019**

Investigadores:

Mario René Rivas Domínguez y Milton José Martínez Ventura.

Contribuciones especiales al proyecto:

Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), por proporcionar archivo digital con base de datos de parámetros meteorológicos: precipitación, temperatura y humedad relativa, para el periodo 2018.

Martin Rapilly, Profesor de Geografía de la Universidad Autónoma de San Domingo, República Dominicana, por la asesoría técnica.

Oscar Antonio Peña Rodas, Coordinador adjunto de investigación de la Universidad Doctor Andrés Bello San Salvador, por la traducción del resumen.

Milton José Martínez Ventura, Especialista en Proyectos de Ciencias Económicas, UNAB, piloto de dron y otorgante de la concesión del derecho de uso de imágenes aéreas, limitadas a este informe y elaboración de mapas: Áreas estimadas de cultivo de maíz y Área estimada de cultivo de arroz; Nacional y por cada zona geográfica para el año 2018.

¹ Cualquier correspondencia deberá dirigirse a: Dr. Roberto Hernández Rauda, Director de Investigación y Proyección Social, Universidad Doctor Andrés Bello, 1ª Calle Poniente y 41 Av. Norte #2128, Col. Flor Blanca, San Salvador, El Salvador. Casilla de correo electrónico: roberto.rauda@unab.edu.sv, Tel. (503) + 25107455.

Índice

Prólogo.....	i
Resumen.....	iii
Abstract.....	v
1. Introducción.....	1
2. Conceptos Preliminares.....	3
3. Métodos.....	10
3.1 Generalidades.....	10
3.1.1 Localización y Descripción de la Zona de Estudio.....	10
3.1.2 Herramientas de software.....	12
3.2 Procedimientos.....	13
3.2.1 Fase: Recopilación de información.....	13
3.2.2 Fase: Procesamiento de información.....	16
3.2.3 Elaboración de mapas.....	27
4. Resultados.....	29
4.1 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2013.....	29
4.2 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2014.....	32
4.3 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2015.....	35
4.4 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2016.....	38
4.5 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2017.....	41
4.6 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2018.....	44
4.7 Resultados de variación multianual en áreas de cultivos.....	47
4.7.1 Variación en áreas de cultivo a nivel nacional.....	47
4.7.2 Variación en áreas de cultivo Zona Central.....	50
4.8 Aplicación en ArcGIS Online.....	53
5. Discusión.....	59
6. Conclusiones.....	64
7. Referencias.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de percepción remota.	4
Figura 2. Tipos de sensores.	5
Figura 3. Ejemplo de imagen de satélite LandSat 8.	6
Figura 4. Diagrama Espectro Electromagnético.	9
Figura 5. Firmas espectrales tipo de algunos elementos.	9
Figura 6. Mapa de zona de estudio.	11
Figura 7. Procedimientos utilizados.	13
Figura 8. Ortomosaico de parcelas ubicadas en cantón Upatoro, municipio de Chalatenango, departamento de Chalatenango.	14
Figura 9. Imagen de Inventario Nacional de Bosques de El Salvador.	17
Figura 10. Imagen Landsat 8 del cuadrante 18/51 con combinación de bandas color natural (4,3,2), de fecha: 30 de agosto de 2018.	18
Figura 11. Imagen Landsat 8 (cuatro cuadrantes combinados) correspondiente al mes de agosto de 2018.	18
Figura 12. Imagen landsat 8 recortada y ajustada al territorio de El Salvador.	19
Figura 13. Mapa de pendientes de El Salvador, delimitado hasta seis grados.	20
Figura 14. Detalle de macro clases de clasificación.	21
Figura 15. Ejemplo de imagen satelital clasificada.	22
Figura 16. Detalle de imagen satelital clasificada (acercamiento).	22
Figura 17. Firma espectral de maíz.	23
Figura 18. Firma espectral de arroz.	24
Figura 19. Kriging correspondiente a datos de precipitación 2018.	26
Figura 20. Mapa base de cartografía digital.	27
Figura 21. Mapa de precipitación, zona central, año 2013.	29
Figura 22. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2013.	30
Figura 23. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2013.	31
Figura 24. Mapa de precipitación, zona central, año 2014.	32
Figura 25. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2014.	33
Figura 26. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2014.	34
Figura 27. Mapa de precipitación, zona central, año 2015.	35
Figura 28. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2015.	36
Figura 29. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2015.	37
Figura 30. Mapa de precipitación, zona central, año 2016.	38
Figura 31. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2016.	39
Figura 32. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2016.	40
Figura 33. Mapa de precipitación, zona central, año 2017.	41
Figura 34. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2017.	42

Figura 35. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2017.	43
Figura 36. Mapa de precipitación, zona central, año 2018.	44
Figura 37. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2018.	45
Figura 38. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2018.	46
Figura 39. Variación por año de cultivo de maíz a nivel nacional.	48
Figura 40. Variación por año de cultivo de arroz a nivel nacional.	49
Figura 41. Variación por año de cultivo de maíz, zona central.	51
Figura 42. Variación por año de cultivo de arroz, zona central.	52
Figura 43. Pantalla principal.	53
Figura 44. Sección de mapas web.	54
Figura 45. Lista de pestañas para cambio de cada mapa web por año.	54
Figura 46. Leyenda de mapa web	55
Figura 47. Pestañas de selección de gráfico.	55
Figura 48. Gráfico de precipitación.	56
Figura 49. Gráfico de estimación de áreas de maíz.	57
Figura 50. Gráfico de superficie estimada de arroz.	57
Figura 51. Barra de desplazamiento de gráficos por cada año.	58
Figura 52. Gráficos de distribuciones de estimación de superficies.	58

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de Plataformas LANDSAT 8 y EOS TERRA.	8
Tabla 2. Descripción de herramientas de software.	12
Tabla 3. Escenas Landsat 8 OLI utilizadas.	15
Tabla 4. Variación en áreas de cultivo de maíz y arroz a nivel nacional.	47
Tabla 5. Variación en áreas de cultivo de maíz y arroz, zona central.	50

Siglas y Abreviaturas

Siglas

ASTER	Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica Espacial
CENTA	Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova”
CNR	Centro Nacional de Registros
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GLONASS	Sistema Global de Navegación por Satélite de Rusia
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDT	Modelo Digital de Terreno
OLI	Sensor Operacional de Imágenes en Tierra
ONG	Organización no gubernamental
PNG	Gráficos de Red Portátiles
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
TIRS	Sensor Termal de Infrarrojos
URL	Localizador Uniforme de Recursos
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

Abreviaturas

ha	hectárea	µm	micrómetro
Km	Kilómetro	nm	nanómetro
m	metro	s.f.	sin fecha
mm	milímetro	m.s.n.m.	metros sobre el nivel del mar

Prólogo

En la actualidad la tecnología juega un papel fundamental en la modernización de muchas áreas y la agricultura no es la excepción; por ello en este campo ofrece múltiples opciones de manejar de forma más eficiente los cultivos; una de ellas a través del desarrollo de estudios de variabilidad espacial de superficie agrícola, basados en procedimientos de teledetección y el uso de productos de sensores remotos como son las imágenes satelitales.

Estudios sobre estimación geoespacial de la superficie de granos básicos en países cuya economía depende en gran medida de la producción agrícola como El Salvador; son de gran trascendencia, ya que aporta datos relevantes a numerosos actores económicos como: organizaciones de productores, exportadores, empresas proveedoras de insumos para el sector agrícola; también sociales por ejemplo ONG's vinculadas a la producción agrícola y políticos como entidades gubernamentales y municipalidades; quienes los requieren para mejorar sus procesos de toma de decisiones, planificar acciones enfocadas en la asignación óptima de recursos entre otros; pero no solo es importante conocer la estimación de superficie agrícola; sino también los factores que puedan incidir en dicha variabilidad de área cultivada, como por ejemplo la precipitación; que en países como El Salvador en los últimos años se ha visto afectado por fenómenos naturales como inundaciones; pero con mayor frecuencia por sequía meteorológica, la cual ha impactado enormemente la agricultura y por consecuencia la economía en todos los niveles o escalas, llegando a poner en riesgo incluso la seguridad alimentaria.

Por todo lo anterior un grupo de investigadores de la Universidad Dr. Andrés Bello del área de tecnología, ha desarrollado esta investigación que trata sobre la estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos de la zona central de El Salvador 2013-2018; basada en tecnología informática específicamente en sistemas de información geográfica; a través del desarrollo de cartografía digital, aplicando procesos de percepción remota, para hacer estudios en grandes extensiones territoriales, partiendo de pequeñas parcelas muestreadas, permitiendo obtener resultados en menor tiempo; estudio que me complace en prologar esperando sea una herramienta de consulta de información oportuna relativa a estimación de superficie de maíz, arroz y precipitación e incluso punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones.

MAE. DHC. Ana Marta Concepción Moreno de Araujo
Rector

Resumen

El presente estudio es una extensión de la investigación realizada en 2018, cuyo principal objetivo fue estimar los efectos por variabilidad de precipitación, en superficie cultivada en la zona central de El Salvador, 2013 – 2018, mediante procesos de teledetección. La zona de estudio comprende los departamentos de San Salvador, La Libertad, Cuscatlán, La Paz y San Vicente; las fuentes principales de datos fueron: ortomosaicos y coordenadas de ubicación de parcelas de muestra, capas vectoriales: delimitación departamental y cuerpos de agua; imágenes de satélite Landsat 8 y datos de precipitación de 23 estaciones meteorológicas del MARN.

La metodología utilizada para delimitar el área de cultivo de maíz y arroz fue la de clasificación de imagen supervisada, que requiere tener conocimiento previo de la zona de estudio, donde se definen los polígonos de muestra y para generar mapas de precipitación se utilizó el método Kriging, el cual es idóneo para el tratamiento de variables meteorológicas.

El resultado principal fue una base cartográfica digital compuesta por 18 mapas estáticos en formato PNG y una aplicación web con mapas dinámicos; con datos relevantes tales como el promedio de superficie estimada de maíz que en la zona central fue de: 64,405.36 hectáreas por año; en el caso del cultivo de arroz, el promedio de superficie fue de 1,728.61 hectáreas anuales.

El mayor incremento de área para maíz, en la zona central, se registró en 2014 con 23798.72 hectáreas; situación similar ocurrió con el área de arroz, con 1230.14 hectáreas en 2016; también hubieron decrementos significativos: 20,647.81 hectáreas de maíz menos en 2018 y 1,079.50 hectáreas de arroz menos en 2015; años con un bajo registro de lluvia acumulada de hasta 1,253 mm, lo cual indica un marcado efecto de la pluviosidad en la estimación de superficie estimada.

La superficie de arroz mostró mayor disminución de área en años catalogados con sequía meteorológica (2015 y 2016) que la de maíz; de acuerdo a los resultados obtenidos en la zona central; ésta fue de las menos proclive a reducción de superficie por efecto de la disminución de precipitación, es decir, por sequía meteorológica, contrastando con la tipificación que hace la FAO en el corredor seco centroamericano para esa zona.

Palabras claves: estimación de áreas de cultivo, precipitación, percepción remota.

Abstract

The present study is an extension of the research carried out in 2018, which main objective was to estimate the effects of precipitation variability, in crop areas within central El Salvador, 2013-2018, through remote sensing processes. The study area includes the departments of San Salvador, La Libertad, Cuscatlán, La Paz and San Vicente; The main sources of data were: orthomosaic and location coordinates of sample plots, vector layers: departmental delimitation and water bodies; Landsat 8 satellite images and precipitation data from 23 MARN weather stations.

The methodology used to delimit the area of corn and rice cultivation was that of supervised image classification, which requires prior knowledge of the study area, in which the sample polygons are defined and to generate precipitation maps the Kriging method was used, which is suitable for the treatment of meteorological variables.

The main result was a digital cartographic base composed of 18 static maps in PNG format and a web application with dynamic maps; with relevant data such as the average estimated area of corn that in the central area was: 64,405.36 hectares per year; In the case of rice cultivation, the average area was 1,728.61 hectares per year.

The largest increase in area for corn, in the central zone, was recorded in 2014 with 23798.72 hectares; a similar situation occurred with the rice area, with 1230.14 hectares in 2016; there were also significant decreases: 20,647.81 hectares of corn less in 2018 and 1,079.50 hectares of rice less in 2015; years with a low accumulated rainfall record of up to 1,253 mm, which indicates a marked effect of rainfall in the estimated surface estimate.

The rice area showed a greater decrease in area in years cataloged with meteorological drought (2015 and 2016) than that of corn; according to the results obtained in the central zone; This was one of the least prone to surface reduction due to the decrease in precipitation, that is, due to meteorological drought, in contrast to FAO's typification in the Central American dry corridor for that area.

Keywords: estimation of crop areas, precipitation, remote perception.

1. Introducción

La presente investigación trata sobre estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos en la zona central de El Salvador para el periodo 2013-2018, y tuvo como objetivos:

- Estimar superficies agrícolas de maíz y arroz para un período de seis años, mediante procesos de teledetección.
- Cuantificar rangos de precipitación anual acumulada para la zona central de El Salvador, a través de un método de interpolación.
- Representar estimación anual de superficie agrícola y de precipitación acumulada, a través de cartografía digital de la zona central de El Salvador.
- Determinar la variación en superficie agrícola por efectos de la variabilidad en precipitación en la zona central de El Salvador para cada año de estudio.
- Desarrollar una aplicación web en ArcGIS Online, para la visualización y consulta temporal-espacial de datos de efectos en superficie agrícola, relacionados con la variabilidad de precipitación.

La relevancia y pertinencia de hacer esta estimación geoespacial, se fundamenta en el cálculo automatizado de la expansión o contracción anual que puede haber en las superficies de cultivo de maíz y arroz; la elección de estos granos básicos obedece a la importancia que representan la producción de éstos en la economía de El Salvador; ya que entre otras cosas son fuente de nutrición, de materia prima, de empleo e incluso de ingresos; a diferentes niveles ya sea familiar cuando se producen para consumo; así como a gran escala cuando es para comercialización.

A lo largo del tiempo la producción agrícola en El Salvador se ha visto afectada en gran medida por los fenómenos meteorológicos, siendo la sequía uno de los más frecuentes en los últimos años y que ha causado gran impacto en la agricultura; razón por la cual, se agregó en este estudio la variable precipitación y se hizo una cuantificación en tres momentos antes, durante y después de ocurrido dicho fenómeno; para analizar la incidencia que la cantidad de pluviosidad pueda tener respecto a la estimación de superficie agrícola.

La primera sección presenta una serie de conceptos importantes de conocer a fin de contextualizar al lector; que van desde lo general como: estimación geo espacial y teledetección o percepción remota, que se refiere a procesos o mecanismos de obtención de información de todo objeto o superficie terrestre sin entrar en contacto con ésta; hasta lo más particular como: la descripción de los tipos de sensores; características de las imágenes satelitales Landsat 8; el espectro electromagnético las bandas que lo componen y la definición de firma espectral con énfasis especial en el análisis de datos y comportamiento típico de una firma espectral de vegetación.

Posteriormente se describe la zona de estudio, mostrando un listado de los lugares donde se hizo levantamiento de datos in situ y sirvió para definir el alcance geográfico del estudio.

En el apartado de métodos se describen los procedimientos utilizados en cada de las fases del proyecto, las cuales se detallan a continuación:

Recopilación de información: en esta fase se describen todos los elementos necesarios para el desarrollo de la cartografía como fue: el procedimiento para adquirir imágenes Landsat 8, los cálculos realizados en la base de datos de precipitación del MARN y el procedimiento de descarga de las capas vectoriales del CNR.

Procesamiento de información: comprende los procedimientos necesarios para transformar los datos fuente en cartografía digital; entre los principales están: georreferenciación de imágenes aplicado al mapa de inventarios de bosques del MARN, cuya utilidad fue obtener superficies de diferentes tipos de bosques para discriminar las zonas de cultivo; el pre procesamiento de imágenes satelitales que incluye: la composición de bandas para cada imagen; la unión de escenas y el recorte o delimitación de imágenes satelitales ajustada al territorio del país; la elaboración de cartografía complementaria como el mapa de pendientes, el cual fue importante para delimitar las superficie estimada de arroz. Esta fase también incluye la metodología de clasificación de cobertura utilizada, la cual se basó en clasificación de imagen supervisada; que contiene implícito el cálculo de firmas espectrales de cada cultivo; finalmente se describe el método de interpolación de datos de precipitación utilizado, es decir, el método geo estadístico kriging, que se ajusta para estudios relacionados con datos meteorológicos; se describe además la secuencia de pasos para generar mapas.

La sección de resultados presenta toda la base cartográfica elaborada en formato PNG, lo cual permite compartirla con cualquier usuario; ésta se clasifica en tres tipos: mapa de precipitación anual acumulada, el cual muestra áreas con valores mínimos y máximos; mapa de estimación de áreas de cultivo de maíz y de arroz; cada uno con sus elementos básicos como el título para identificar el dato que se está representando, la zona geográfica y el año correspondiente; una leyenda que describe la simbología reflejada en el mapa para que el lector pueda hacer una interpretación adecuada de los datos; escala del mapa y la fuente de datos de la cartografía; se presentan tablas y gráficos que muestran cálculos sobre áreas de cultivo y la variación de estas áreas a lo largo del tiempo tanto a nivel nacional como en la zona central; y al final se describe una aplicación web, desarrollada en la plataforma Arcgis Online; que integra todos los resultados mencionados en forma dinámica e interactiva y tiene como propósito servir como herramienta de consulta temporal – espacial de los datos.

A manera de conclusión principal se obtuvo que el análisis de productos de sensores remotos abordado en este estudio, permitió hacer una delimitación de cobertura del suelo agrícola con buena precisión; dando como resultado cartografía que aporta información que será de gran utilidad en la toma de decisiones para instituciones gubernamentales como el CENTA o Alcaldías Municipales; quienes trabajan en conjunto con agricultores asociados o individuales a fin de mejorar su producción año con año; así también se identificó el grado de afectación de la zona central por reducción de superficie de cultivo de maíz y arroz, por efectos de sequía meteorológica.

2. Conceptos Preliminares

A continuación, se presenta la definición de algunos conceptos que son importantes para entrar en materia de la presente investigación.

Estimación geoespacial

Para este estudio en particular este término hace referencia a la delimitación de superficie agrícola; Paruelo, Guerschman, Baldi y Di Bella (2004, p.421) afirman que: “Las estimaciones de la superficie agrícola puede caracterizarse en torno de tres dimensiones: la conceptual, la espacial y la temporal”; además (Farina, 1997; citado por Paruelo, Guerschman, Baldi y Di Bella et al, 2004, p.421) define cada una de esas dimensiones de la siguiente manera: “La resolución conceptual hace referencia a la capacidad de discriminar entre dos o más entidades. La resolución espacial puede ir desde el lote individual a todo el país y la resolución temporal se refiere a la frecuencia de las estimaciones”.

En ese sentido para este estudio la dimensión conceptual se refiere a la delimitación de áreas de cultivo de maíz y arroz; la espacial a la zona central de El Salvador y por zona geográfica y la temporal comprende un periodo de seis años 2013 a 2018.

Teledetección

Para Labrador, Évora y Arbelo (2012, p.9) la teledetección se refiere:

Al vocablo usado por los hispanoparlantes para referirse al término inglés “remote sensing” que se traduce literalmente como percepción remota. Se refiere a la ciencia, técnica o, incluso “arte” para algunos, de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él.

Esta interacción se logra a través del flujo de energía proveniente de dos posibles fuentes: la solar o energía generada por el propio sensor, la cual se propaga a través de la atmósfera luego es reflejada, absorbida o transmitida por los diferentes cuerpos o superficies terrestre; el flujo que retorna es el que registra el sensor.

Los trabajos iniciales en el campo de la teledetección ocurrieron hace ya varias décadas según lo manifiesta Labrador, Évora y Arbelo (2012, p. 10) “uno de los primeros antecedentes, comenzó en el periodo de 1946 a 1950, cuando se lanzaron desde Nuevo México (EE.UU.) los primeros cohetes V-2 con pequeñas cámaras fotográficas instaladas en ellos como sensores remotos”.

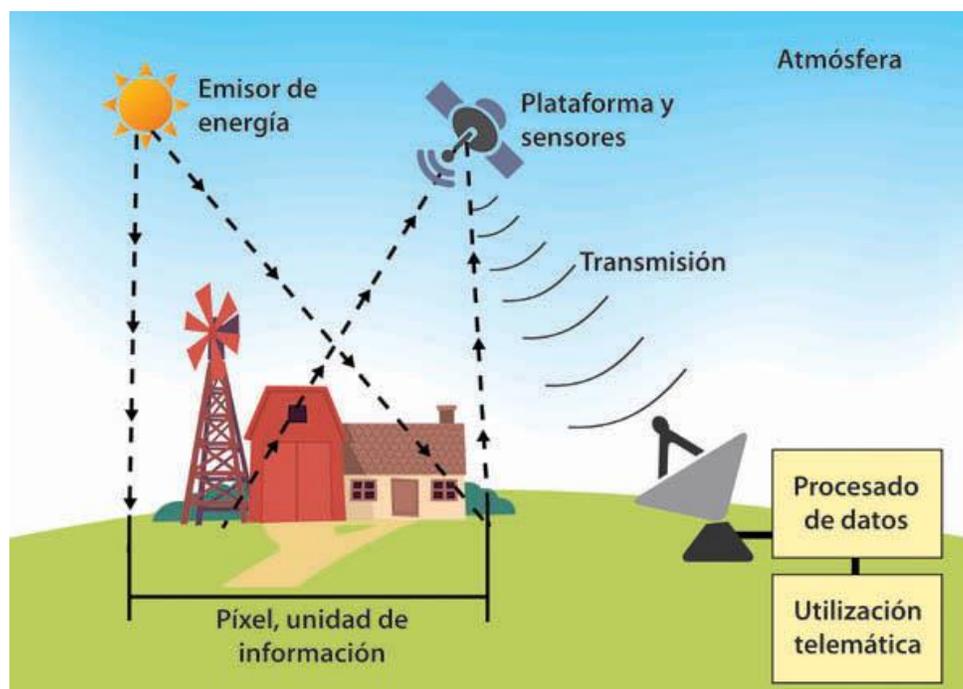


Figura 1. Diagrama de percepción remota.

Fuente: Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente. (2019). Percepción Remota. República Dominicana. Recuperado de: <https://www.diccionariomedioambiente.org/DiccionarioMedioAmbiente/es/verInformacion.aspx?id=1117>.

Sensores

En todo sistema de teledetección los sensores son un elemento fundamental, ya que a través de este dispositivo se capta la energía reflejada por la superficie; estos sensores tal como lo mencionan Chartuni y Magdalena (2014, p.31) “Generalmente están a bordo de vehículos no tripulados principalmente en satélites, la energía que registran es transformada en señales eléctricas que, posteriormente, son enviadas a estaciones terrestres y, en forma de gráficos, tablas y/o imágenes, son interpretadas para finalidades específicas”.

Tomando como referencia la fuente de energía se puede distinguir dos tipos de sensores:

Sensores pasivos

Bravo (2017, p. 11) describe esta clase de sensores pasivos de la siguiente manera:

Son de mayor valor en las aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de los recursos naturales. Los sensores pasivos simplemente reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales, generadas por la radiación solar natural, puede proveer una información muy rica sobre los objetos percibidos. Ejemplos: ASTER, LandSat, MODIS, SENTINEL.

Sensores activos

Para Bravo (2017, p. 12) un sensor activo es: “el que emite radiación dirigida hacia el objetivo a ser estudiado. La radiación reflejada de ese objeto es detectada y medida por el sensor. Ejemplos: Lidar, Radar, Sonar”.



Figura 2. Tipos de sensores.

Fuente: EcuRed: Enciclopedia cubana. (s.f.). Sensores remotos. Recuperado de: https://www.ecured.cu/images/b/bf/Sensores_remotos.jpg

Imagen Satelital

Uno de los insumos primordiales para todo estudio de percepción remota son las imágenes satelitales, las cuales aparte de ser una representación visual del territorio contienen una gran cantidad de información que los sensores almacenan para cada imagen que procesan.

Toda imagen satelital según Bravo (2017, p. 18)

Está confeccionada por matrices, en las que cada celda representa un píxel, las dimensiones de este píxel dependerá de la resolución espacial del sensor. Los sensores registran la radiación electromagnética que proviene de las distintas coberturas y las almacena en cada píxel, de acuerdo a los intervalos de longitudes de onda, en las que este programado el sensor para captar.

Esta energía electromagnética es representada en cada píxel por un valor digital al cual se le agrega una tonalidad, este valor es llamado Nivel Digital (ND), la cantidad de niveles digitales que se podrá representar dependerá de la Resolución Radiométrica del sensor, para un sensor con Resolución Radiométrica de 8 bit los niveles digitales varían entre 0 y 255, siendo en la escala de grises el cero igual al color negro y el 255 igual al color blanco.

La posición de cada píxel en la imagen satelital está determinada por un eje de coordenadas XYZ siendo X es el número de columna de la matriz; Y el número de fila de la matriz y Z el nivel digital o valor de intensidad de la escala de grises.

Las imágenes del satélite LandSat son una de fuente principal para el desarrollo de este estudio y de acuerdo a Marini (2015, p. 113) este satélite tiene como principal ventaja:

Poseer en una resolución temporal de 16 días, lo que permite contar con información satelital en momentos claves de los diversos ciclos fenológicos. Dicha característica es de fundamental importancia para la identificación de los diferentes cultivos, ya que aporta información imprescindible durante las etapas de siembra, crecimiento, desarrollo y cosecha de los mismos.

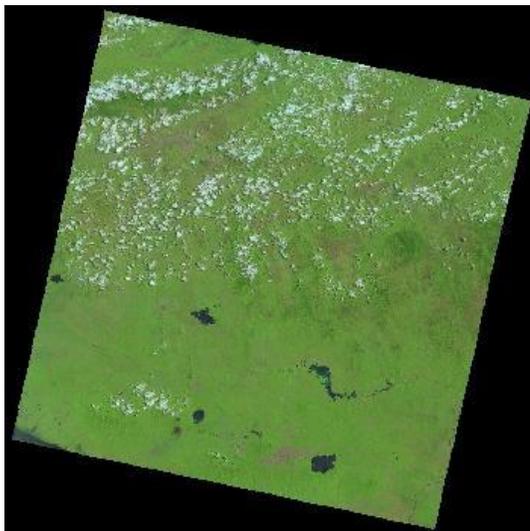


Figura 3. Ejemplo de imagen de satélite LandSat 8.

Fuente. USGS. Science for changing world. (s.f.). Earth Explorer Home. Estados Unidos

Recuperado de:

https://ims.cr.usgs.gov/browse/landsat_8_c1/2018/019/050/LC08_L1TP_019050_20180720_20180731_01_T1.jpg

La figura 3 corresponde al cuadrante 19/50 de una imagen del satélite LandSat8, el cual representa geográficamente a la zona norte de El Salvador, la imagen data del

20 de julio de 2018, la plataforma de descarga también ofrece datos importantes como: el sistema de referencia, el porcentaje de cobertura de nubes, los cuales son importantes para tomar la decisión al momento de descargar este tipo de imágenes ya que de ellos depende en gran medida la calidad de resultado de los análisis que se realizan posteriormente.

Descripción de los sensores del satélite Landsat 8

Imagen operacional de la Tierra (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS) – LandSat 8

Toda imagen satelital de Landsat 8 se compone de una serie de bandas las cuales almacenan un valor, estos en combinación sirven para realizar diversos análisis; Bravo (2015, p. 21) hace una descripción de las bandas que posee:

Este tipo de sensor está compuesto por nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de Bandas 1 a 7 y 9. La banda ultra azul 1 es útil para estudios costeros y aerosoles. Banda 9 es útil para la detección de nubes cirrus. La resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas de la superficie más precisa y se recogen a 100 metros. El tamaño aproximado es de 170 km escena de norte a sur por 183 km de este a oeste.

Satélite ASTER

En el presente estudio también se incluye como fuente principal un modelo digital de elevación que corresponde al territorio de El Salvador; el cual deriva de imágenes ASTER las cuales según Bravo (2015, p. 49):

Son captadas por la plataforma TERRA de la NASA, puesto en órbita en diciembre de 1999 por el gobierno de Estados Unidos y de Japón, que son los responsables del diseño, calibración y validación de los instrumentos, además estos datos se usan para crear mapas detallados de la temperatura superficial de la tierra, emisividad, reflectancia y elevación.

Tabla 1. Descripción de Plataformas LANDSAT 8 y EOS TERRA

Elemento	Plataforma	
	LANDSAT 8	EOS TERRA
Sensor	OLI/ TIRS	ASTER
Lanzamiento	11/02/2013	18/12/1999
Altitud de órbita	705Km	708Km
Resolución Radiométrica	12 bits	8 bits (B1-9) 16 bits (B10 - 14)
Resolución Espacial	30m (B8 15m)	15m (VNIR) 30m (SWIR) 90m (TIR)
Resolución espectral	11 bandas	14 bandas
Frecuencia de nuevas imágenes	16 días	16 días
Tamaño de la imagen	185Km x 185Km	60Km x 60Km
Archivo	2013 - Presente	2000 - Presente

Nota: Km: kilómetro; m: metro.

Fuente: "Diferencia de características de plataformas y sensores" por N.F. Bravo. (2017) p.52. Adaptado de: "Teoría – Teledetección espacial Landsat, Sentinel -2, ASTER L1T y MODIS, Primera Edición", Huánuco – Perú.

Espectro Electromagnético

Para von Martini, Bragachini, Bianchini, Martellotto y Méndez (s.f., p.2):

El espectro electromagnético consiste en todas las longitudes de onda de la energía electromagnética. El espectro continuo se subdivide en algunos tipos familiares de energía electromagnética como los rayos X, rayos ultravioletas (UV), visibles, infrarrojo (IR), microondas, y ondas de radio. Estos distintos tipos de energía electromagnética son categorizados por su posición, o longitudes de onda, en el espectro electromagnético. Los rayos X tienen longitudes de onda muy pequeñas, alrededor de 0.0001 micrómetros, y las ondas de radio pueden tener longitudes de onda grandes, hasta 100 m.

También para la NASA citado por Bravo (2017, p.9), el espectro electromagnético es "el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía que se mueve, armónicamente, a la velocidad constante de la luz".

Campillo, Prieto, Millán y Fortes, (2016, p. 170); describen las bandas y rangos de valores útiles en estudios de vegetación:

Las partes del espectro que suelen tener más interés en los cultivos son el verde (500-550 nm), el rojo (600-700 nm) y el infrarrojo cercano (720-800 nm). Para facilitar el uso práctico de la información proporcionada por la reflectancia de las cubiertas vegetales se utilizan índices de vegetación que

combinan en fórmulas matemáticas los valores de reflectancia para diferentes longitudes.

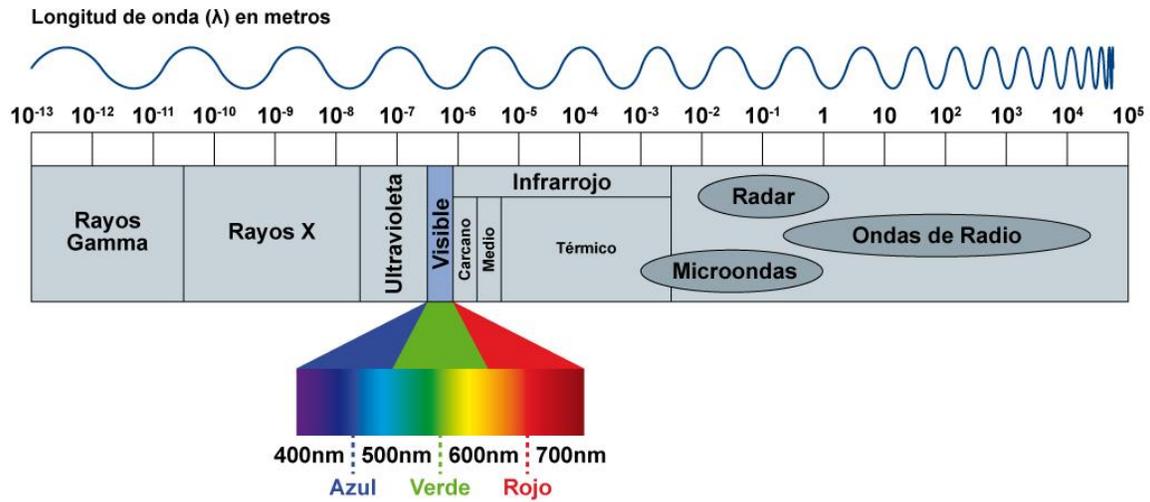


Figura 4. Diagrama Espectro Electromagnético.
Fuente: Centro de Recursos Digitales. Educar Chile. (s.f.). Chile. Recuperado de: <http://centroderecursos.educarchile.cl/bitstream/handle/20.500.12246/40847/Diagrama18.jpg?sequence=1&isAllowed=y>

Firma Espectral

Según la NASA (2011) citado por Bravo (2017, p.10) La firma espectral “es la reflectancia como una función de longitud de onda; cada material tiene una firma única, por lo tanto, se puede utilizar para la clasificación de materiales.”

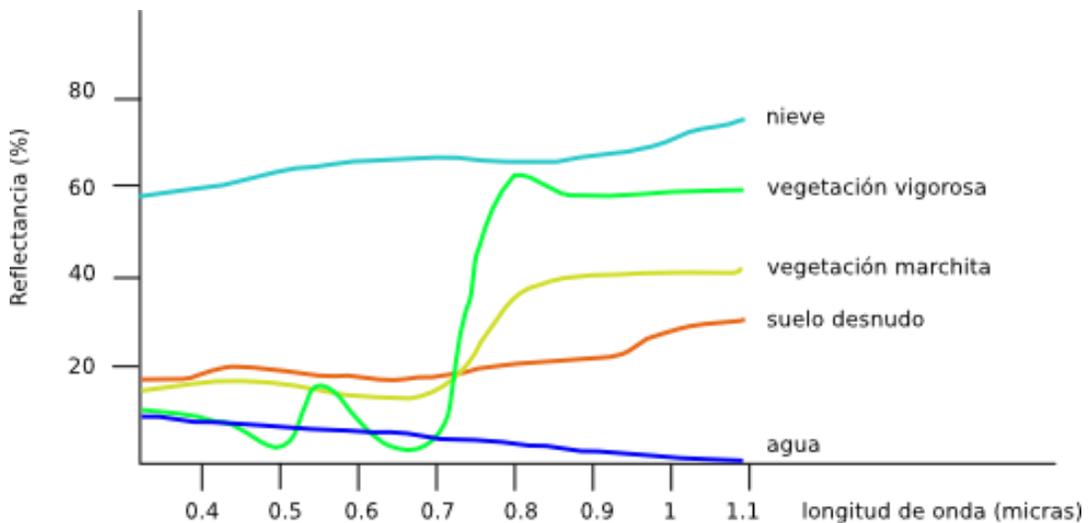


Figura 5. Firmas espectrales tipo de algunos elementos.
Fuente: Olaya V. (s.f.). Sistemas de Información Geográfica. Un libro libre de Víctor Olaya. Recuperado de: <https://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Imagenes.html>

Uso de los datos de percepción remota

Las características de la superficie no se pueden obtener de forma directa a través de los procesos de percepción remota, lo que se hace son deducciones de información de las medidas; estas deducciones y según von Martini et al (s.f., p.9)

Requieren el uso de herramientas de análisis para encontrar relaciones entre los datos del sensor y los datos medidos en el suelo o las plantas; esto permite realizar extrapolación de datos y estudio en grandes extensiones donde no se ha hecho la medición en tierra, es aquí donde la percepción remota adquiere un gran valor ya que estos procesos permiten adquirir diversidad de información en poco tiempo.

3. Métodos

Según Paruelo et al (2004, p. 421.)

Para resultar confiables y útiles las estimaciones deben satisfacer una serie de características. Por un lado, deben basarse en una metodología debidamente documentada y reproducible en el espacio y en el tiempo. Por ello a continuación se presentan el detalle de los métodos y procedimientos incluidos en el presente estudio.

3.1 Generalidades

3.1.1 Localización y Descripción de la Zona de Estudio.

La estimación geoespacial de áreas de cultivo de arroz y maíz, representadas a través de cartografía digital, se realizó en la zona central conformada por los departamentos de: San Salvador, La Libertad, Cuscatlán, La Paz y San Vicente.

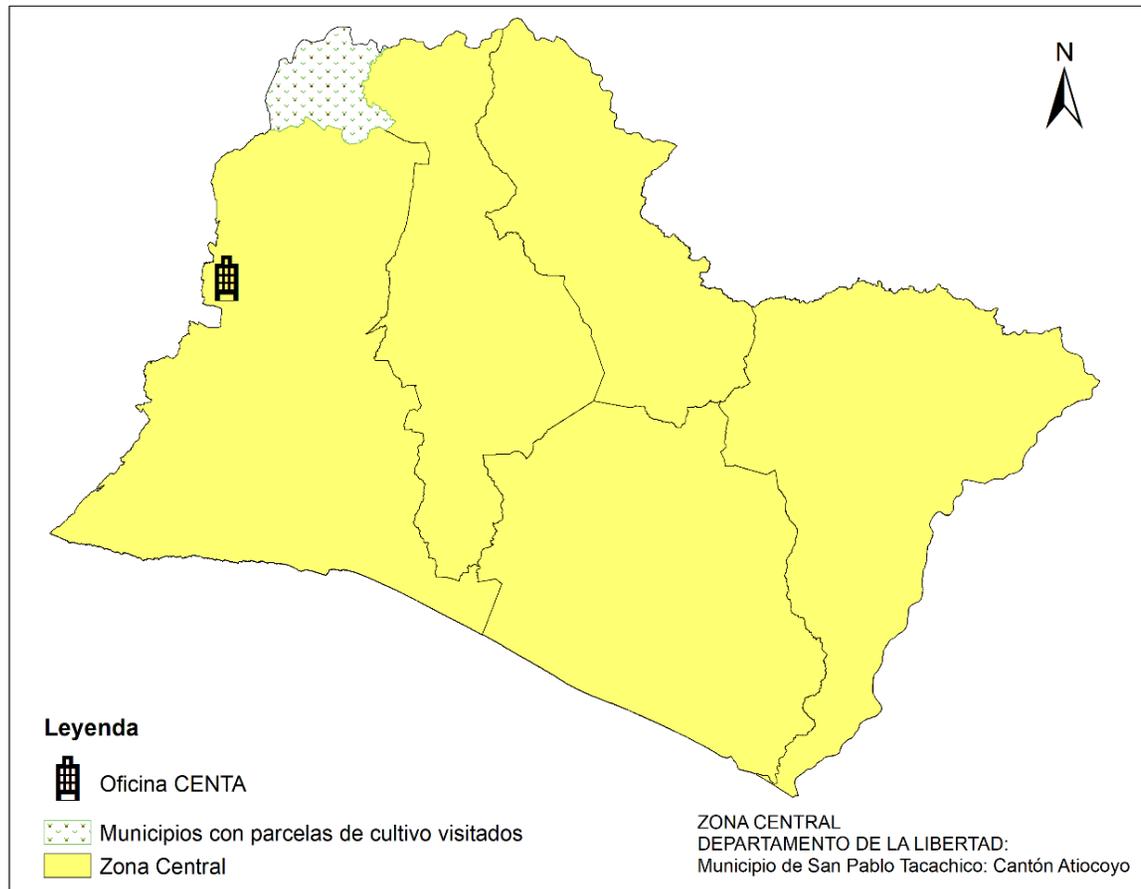


Figura 6. Mapa de zona de estudio

Fuente: Rivas, M.R.; Martínez, M. J.; Escuintla, J.J.; Monterroza J.N. y Cano, S. A. (2019, p. 6). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

3.1.2 Herramientas de software

Tabla 2. Descripción de herramientas de software.

Herramienta	Descripción	Utilidad
ArcMap 10.6	“Aplicación central utilizada en ArcGis donde se visualizan y exploran los dataset, se asignan símbolos y crean los diseños de mapa para imprimir o publicar; también se utiliza para crear y editar los dataset.” (ESRI, 2016, párr. 1).	Elaboración de capas y cartografía estática. Elaboración de Kriging.
Arcgis Online	Plataforma web “para la representación cartográfica y análisis basada en la nube”. (ESRI, 2019, párr. 1).	Publicación de capas y mapas web Elaboración de aplicación cuadro de mando
Qgis Desktop 3.0.2	“Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto licenciado bajo - General Public License, corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.” (Documentación QGIS, s.f., párr. 2).	Ejecución de procesos de combinación de banda, unión y recorte de imágenes satelitales. Ejecución de proceso de clasificación semiautomática.
Drone deploy	Esta aplicación sirve para programar el recorrido de vuelo de dron sobre las parcelas de cultivos, y programar la toma automática de fotografías aéreas; se utilizó una versión de prueba la cual está disponible para descarga en el sitio: https://www.dronedeploy.com/ , (DroneDeploy, s.f).	Programación de vuelos de dron sobre parcelas de cultivo.
Agisoft	“Es un producto de software independiente que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales 3D para su uso en aplicaciones GIS”,(Agisoft, 2019); al igual que la anterior se utilizó una versión de prueba, el sitio de descarga es: https://www.agisoft.com/ , está disponible para los sistemas operativos: Windows 64 y 32 bits, Mac OS y Linux.	Generación de ortomosaicos derivados de fotografías aéreas de dron
Google Chrome	Navegador web	Elaboración, configuración y publicación de aplicación web.
Microsoft Excel	Hoja de cálculo	Procesamiento de base de datos de precipitación.

Elaboración propia.

3. 2 Procedimientos

La figura 7, muestra un listado de los principales procedimientos que comprende cada fase.

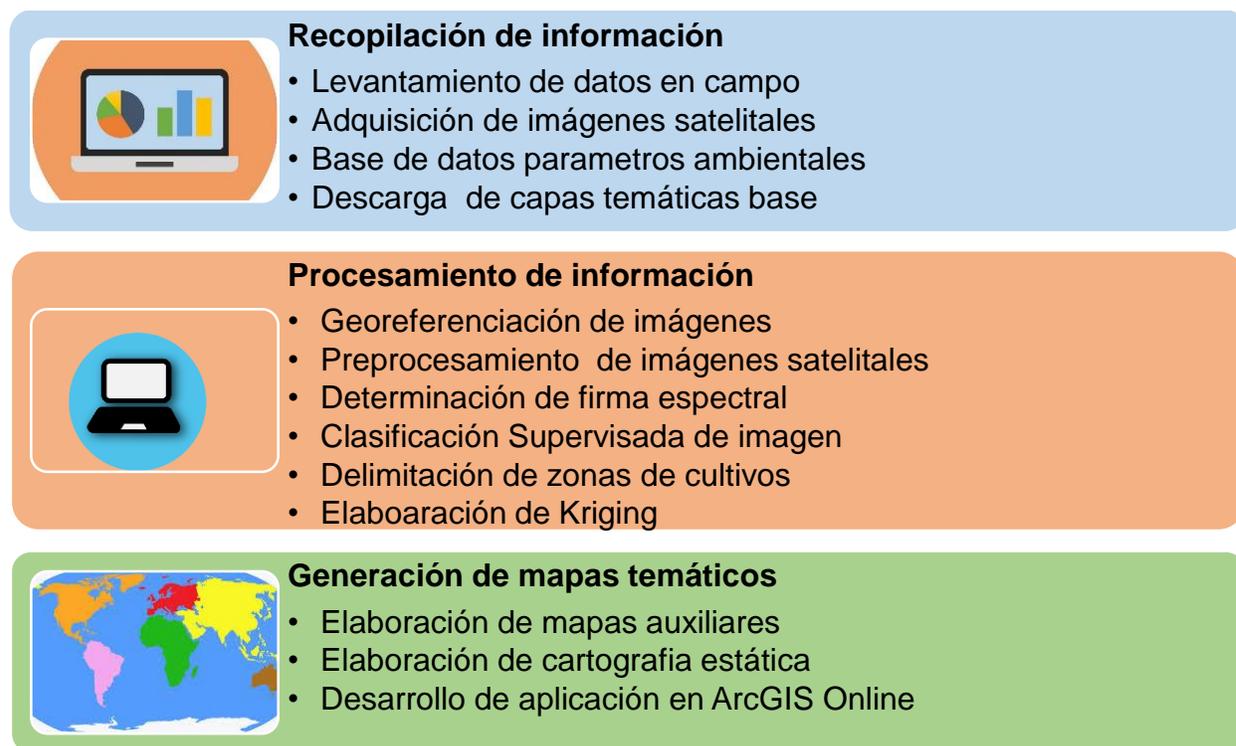


Figura 7. Procedimientos utilizados.
Elaboración propia

3.2.1 Fase: Recopilación de información

En todo estudio de teledetección la información se puede obtener con diferentes tipos de sensores y diferentes escalas, a esto se le conoce como plataforma y según Campillo, Prieto, Millán y Flores (2016, p. 171): “Las plataformas pueden clasificarse en tres niveles, de acuerdo con la distancia entre el sensor y el objetivo de interés: terrestre (vehículos terrestres, muestreos puntuales); aéreo (aviones, helicópteros, drones, etc.); y orbital (naves espaciales, satélites artificiales, etc.)”; de este último tipo derivan las imágenes utilizadas en este estudio.

Levantamiento de datos en campo

Para el desarrollo de esta investigación no se hizo levantamiento de datos en campo; pero se tomaron como referencia para la clasificación de imágenes los 18 orto mosaicos detallados en Rivas et al (2019); los cuales fueron producto de vuelo con dron, esta tecnología de acuerdo a Campillo et al (2019, p.172):

Es una de la plataforma que más atención ha recibido en los últimos años debido a su facilidad de manejo y la alta precisión de las imágenes que capta, inferiores a 5 cm en imagen visible, a 10 cm en imágenes espectrales y a 50 cm en el caso de imágenes térmicas, proporcionando al agricultor una buena perspectiva de su parcela.

A manera de ejemplo en la figura 8 se muestra un ortomosaico generado con dron; los cuales se utilizaron posteriormente como base para dibujar polígonos de muestras para la clasificación de imágenes.



Figura 8. Ortomosaico de parcelas ubicadas en cantón Upatoro, municipio de Chalatenango, departamento de Chalatenango.

Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 10). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales utilizadas en este estudio fueron obtenidas del sitio de U.S Geological Survey, para la descarga de imágenes se tomaron en cuenta dos elementos: el periodo posterior a la siembra del cultivo el cual, para ambos casos, técnicos del CENTA y agricultores propietarios de algunas parcelas visitadas sugirieron debía oscilar entre 90 a 100 días; es decir, cuando la planta presenta mayor vigorosidad reflejada en una marcada coloración verde en su follaje y el otro criterio para seleccionar las imágenes utilizadas fue el porcentaje de nubosidad el

cual se estableció como máximo 30% de nubosidad considerando que eran imágenes de todo el país.

Tabla 3. Escenas Landsat 8 OLI utilizadas.

Escena	Años					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
018/050	31 de julio 16 de agosto	18 de julio 19 de agosto 6 de octubre	19 de junio 21 de julio 6 de agosto	7 de julio 24 de agosto 27 de octubre	26 de julio 27 de agosto 30 de octubre	13 de julio 30 de agosto 1 de octubre
018/051	31 de julio 16 de agosto	18 de julio 19 de agosto 6 de octubre	19 de junio 21 de julio 6 de agosto	7 de julio 24 de agosto 27 de octubre	26 de julio 27 de agosto 30 de octubre	13 de julio 30 de agosto 1 de octubre
019/050	6 de julio 7 de agosto	9 de julio 10 de agosto 29 de octubre	26 de junio 12 de julio 29 de agosto	14 de julio 15 de agosto 2 de octubre	17 de julio 18 de agosto 21 de octubre	20 de julio 05 de agosto 24 de octubre
019/051	6 de julio 7 de agosto	9 de julio 26 de agosto 29 de octubre	26 de junio 12 de julio 29 de agosto	14 de julio 15 de agosto 2 de octubre	17 de julio 18 de agosto 21 de octubre	20 de julio 5 de agosto 24 de octubre

Nota: Escena: se refiere al cuadrante de la imagen satelital. Elaboración propia.

Base de datos de precipitación mensual

La fuente principal para generar mapa de precipitación fue el registro mensual de 23 estaciones meteorológicas, que fue proporcionado por el Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN); en formato Excel; posteriormente se hizo un cálculo de precipitación acumulada anualmente y se asignaron coordenadas geográficas a cada estación (latitud y longitud) para poder tener una representación cartográfica con mayor precisión.

Capas temáticas vectoriales base

Para poder delimitar las imágenes satelitales al área que corresponde a El Salvador y las áreas de cultivo fue necesario utilizar las siguientes capas: límite departamental, límite municipal, cuerpos de agua (lagos y embalse); las cuales están alojadas en el Geo portal del CNR; en el sitio web <https://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>, específicamente en la sección 3- Descarga de cobertura Geográficas.

3.2.2 Fase: Procesamiento de información

Con toda la fuente de información recopilada se dio inicio a esta fase cuya finalidad es transformar todos los insumos (ortomosaicos, imágenes satelitales, datos de precipitación) en capas vectoriales (zonas de cultivo) y raster (datos de precipitación), a continuación, se describen los procedimientos principales de esta fase.

Georreferenciación de cartografía en formato de imagen

Quispe (2014, p.38), describe la georreferenciación de la siguiente manera:

Es el proceso que consiste en dar a cada pixel de una imagen su localización en un sistema de coordenadas estándar para poder, de este modo, combinar la imagen con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud.

De igual forma Ormeño (2006, p. 307), menciona que la función principal de la georreferenciación es:

Integrar documentos cartográficos en soporte papel, o imágenes digitales procedentes de un sensor cualquiera, en un Sistema de Información Geográfica y en el mismo sistema de referencia que el resto de la información cartográfica, de forma que tales documentos sean superponibles con el resto de los documentos gráficos.

La aplicación de este geo proceso en este estudio se ejecutó en Arcmap 10.6 y se aplicó a una imagen que corresponde al Inventario Nacional de Bosques de El Salvador, del MARN; con el objetivo de obtener áreas de las zonas de bosques: latifoliados, conífera, salado y café bajo sombra a fin de hacer una mejor discriminación de la zona de cultivo al momento de clasificar las imágenes satelitales, para asignar puntos de control que correspondieran a El Salvador se tomó como base la capa del límite departamental, además se asignó como sistema de coordenada WGS84, se definieron ocho puntos de control ubicados en los extremos del mapa; con todos esos parámetros se ejecutó la función de georreferenciación de Arcgis que dio como resultado la siguiente imagen:



*Figura 9. Imagen de Inventario Nacional de Bosques de El Salvador.
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018), Inventario Nacional de Bosques de El Salvador (IBN), El Salvador. Recuperado de:
<http://www.marn.gob.sv/descargas/inventario-nacional-de-bosques/?wpdmdl=40920>*

Pre procesamiento de imágenes satelitales

Los procedimientos que se describen a continuación se desarrollaron a fin de ajustar la extensión de las imágenes satelitales al área que corresponde a todo el país.

Composición de bandas

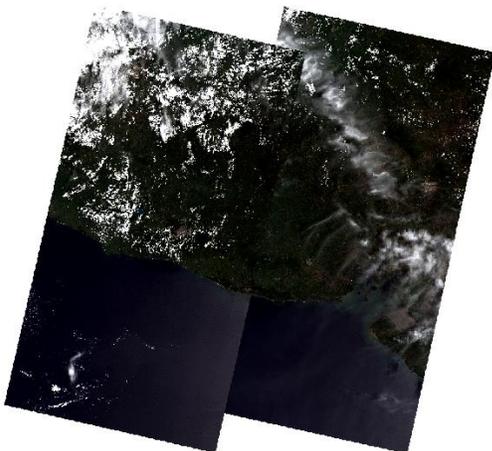
Como se mencionó anteriormente las imágenes Landsat 8 están compuestas por una serie de bandas, las cuales al descargarse se obtienen por separado; sin embargo, para poder hacer una clasificación de imagen para diferentes coberturas entre ellas la vegetal es necesario unir seis bandas, específicamente desde la banda dos a la banda siete; este procedimiento se realizó en QGis a través de la función combinar del menú de trabajo con imágenes raster y dio como resultado una sola imagen en formato TIFF de cada cuadrante o escena (01850, 01851, 01950 y 01951) como la que se muestra a continuación:



*Figura 10. Imagen Landsat 8 del cuadrante 18/51 con combinación de bandas color natural (4,3,2), de fecha: 30 de agosto de 2018.
Fuente de la imagen original: U.S. Geological Survey. EarthExplorer – Home. (s.f).
Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Unión de imágenes

Posterior a la combinación de bandas por cada cuadrante de las imágenes, se procedió a la unión de cuadrantes; este proceso también se realizó con la función combinar de la aplicación de Qgis; en la cual se toman como insumo los cuatro cuadrantes (01850, 01851, 01950 y 01951) de cada una de las imágenes provenientes del procedimiento anterior; el resultado es una sola imagen en formato TIFF, como se muestra a continuación:



*Figura 11. Imagen Landsat 8 (cuatro cuadrantes combinados) correspondiente al mes de agosto de 2018.
Fuente de la imagen original: U.S. Geological Survey. (s.f). EarthExplorer – Home.
Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Recortar imágenes satelitales

El último procedimiento del pre procesamiento de imágenes satelitales es el recorte de éstas, es decir ajustar para ello se utilizó la función cortar raster con capa máscara de Qgis, la fuente fueron las imágenes unidas del procedimiento anterior; este término en SIG se refiere a la capa que se usa de base, plantilla y/o referencia para hacer el corte a una imagen; en este caso se utilizó la capa de límites departamentales; el resultado final fue una serie de 18 imágenes satelitales con siete bandas cada una en formato TIFF como la siguiente:



*Figura 12. Imagen landsat 8 recortada y ajustada al territorio de El Salvador
Fuente de la imagen original: U.S. Geological Survey. (s.f.). EarthExplorer – Home.
Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>*

Cartografía auxiliar complementaria.

Mapa de pendientes

La Universidad de Jaén (2007) lo define como:

“Mapa temático que, mediante cualquier sistema gráfico, representa los diferentes grados de pendiente de un territorio. La pendiente topográfica es la inclinación de una superficie con respecto a la horizontal”.

Este procedimiento se realizó en Qgis y para obtener este mapa se tomó como insumo un modelo de elevación digital correspondiente a todo el territorio de El Salvador; al cual se aplicó la función MDT y se calculó la pendiente en grados, el producto obtenido fue un raster con todas las pendientes del país, el cual se cambió a formato de capa vectorial, lo cual permitió filtrar pendientes de hasta seis grados; parámetro máximo de pendiente sugerida para sembrar arroz (FAO, s.f., párr. 10); a continuación, se presenta el mapa de pendiente resultante.

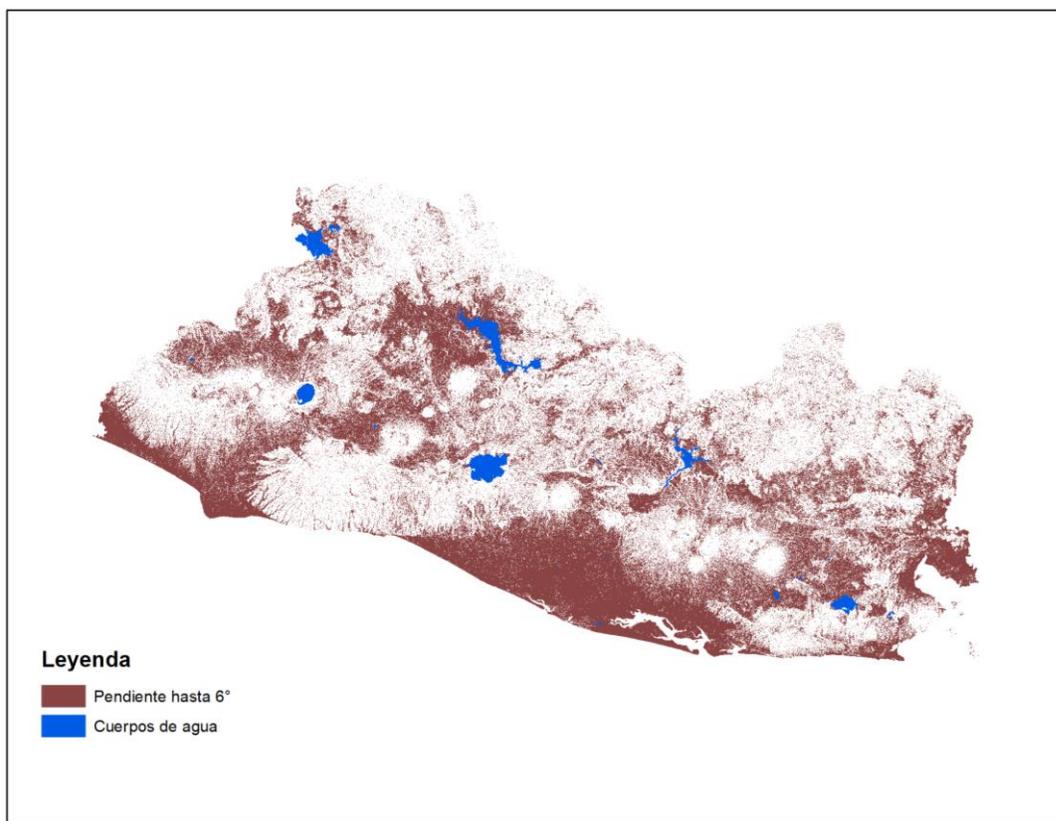


Figura 13. Mapa de pendientes de El Salvador, delimitado hasta seis grados. Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 37). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

Clasificación de cobertura vegetal (Zonas de cultivo)

Este es uno de los principales procedimientos del estudio, fue desarrollado a través del método de clasificación supervisada en Qgis, el cual se aplicó a cada una de las imágenes satelitales escogidas y procesadas para cada mes de los diferentes años del periodo de estudio; sin embargo, la creación de los polígonos de muestra y el archivo de clasificación solo se realizó en la primera ejecución de este complemento; para los siguientes meses solo se cargó el archivo de clasificación junto a la imagen, haciendo la clasificación de forma automatizada.

Según Mendoza y Paola (2011), citados por Quispe (2014, p. 9):

“Los resultados obtenidos en proceso de clasificación supervisada permiten generar el análisis correspondiente a las variaciones en el tiempo de las coberturas o clases definidas. Es decir, a partir de las clasificaciones generadas para cada periodo se calcula la diferencia píxel a píxel, para evaluar los cambios significativos en el tiempo”.

Este procedimiento incluye los siguientes elementos:

- Campos de entrenamiento: son los polígonos de los lotes de control de cada cultivo, los cuales fueron dibujados a partir de los ortomosaicos y del levantamiento con GPS de parcelas cultivadas con maíz y arroz, en este estudio se retomaron los descritos en Rivas et al (2019).
- Georreferenciación de parcelas con cobertura distinta a los cultivos en estudio tales como zonas boscosas la cuales derivaron de imagen de inventario de bosques del país para efectos de hacer discriminación al momento de clasificar la imagen, también detallado en Rivas et al (2019).
- Archivo de clasificación, este es una capa donde se guardan todos los campos de entrenamiento conocidos también como macro clases o categorías de clasificación, en este estudio las macro clases identificadas y creadas fueron retomadas de Rivas et al (2019) y se detallan en la siguiente figura:

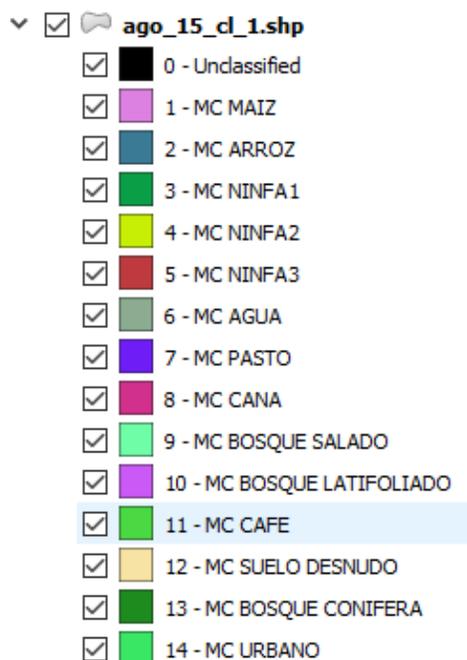


Figura 14. Detalle de macro clases de clasificación.

Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 33). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

- Imágenes Landsat 8, ajustadas al calendario agrícola de ambos cultivos evaluados, las cuales se cargaron al momento de realizar la ejecución de la función en el software dando como resultado una imagen clasificada como la siguiente:

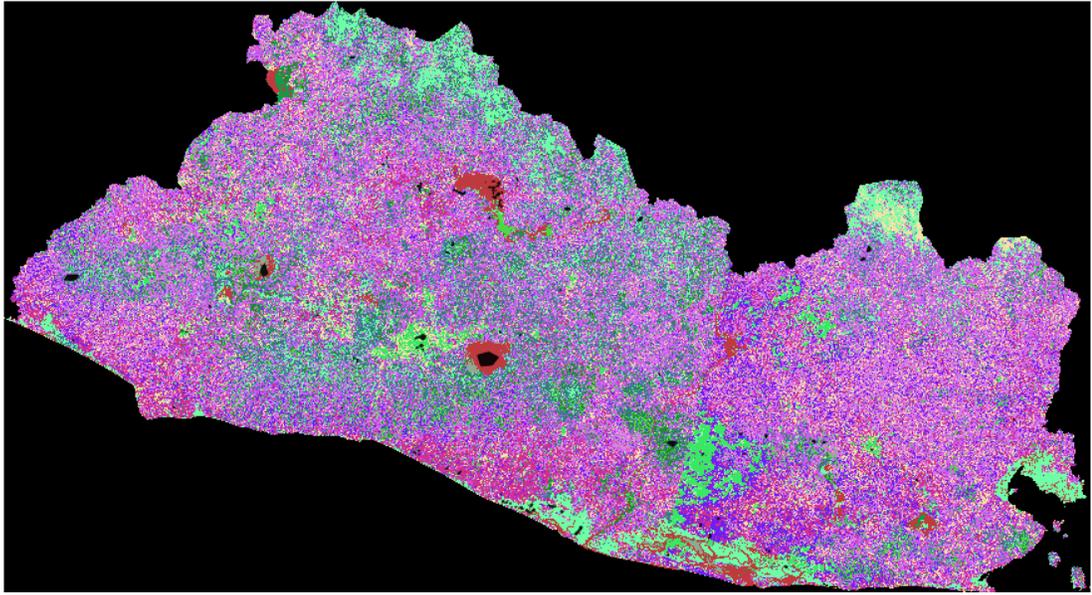


Figura 15. Ejemplo de imagen satelital clasificada
Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 35). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

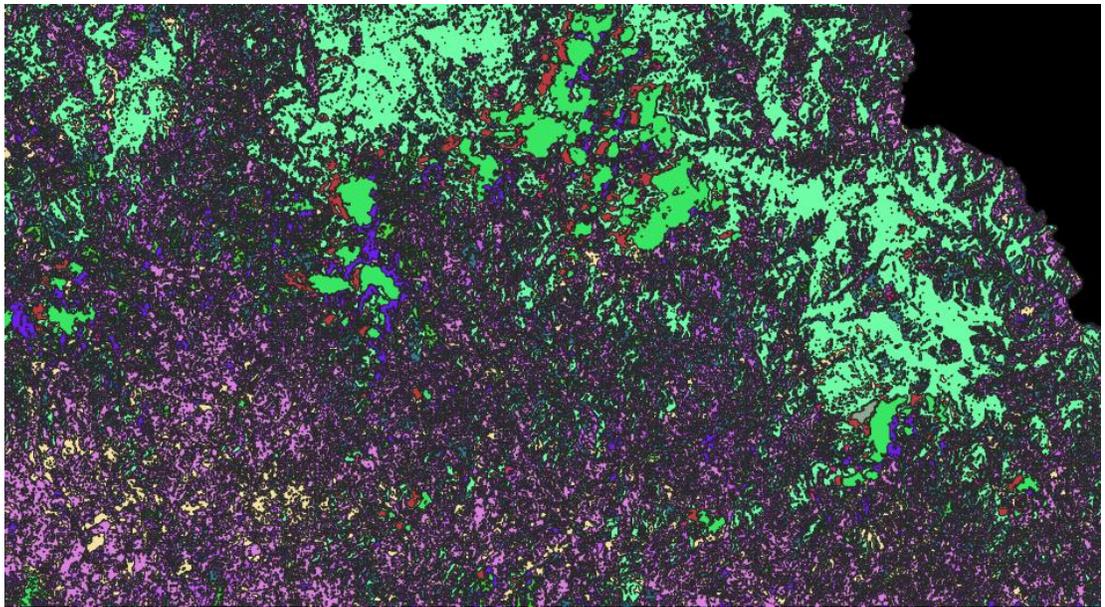


Figura 16. Detalle de imagen satelital clasificada (acercamiento).
Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 35). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

Determinación de firma espectral

Este procedimiento está intrínseco en la clasificación supervisada y se calcula automáticamente para cada superficie, la extracción de firmas espectrales se realizó sobre los cultivos en la etapa en que los mismos presentaban un desarrollo avanzado (cobertura vegetal uniforme), los modelos empleados para la clasificación de cada uno de ellos tienen validez solamente para su aplicación en las imágenes utilizadas en el presente estudio debido a los parámetros específicos para imágenes Landsat 8 seleccionados; el resultado final es un gráfico con rangos de valores para cada una de las bandas y para cada tipo de cobertura de la imagen clasificada; sin embargo solo se hará énfasis en los gráficos de las firmas espectrales del cultivo de maíz y arroz, que son el objeto de este estudio de esta investigación y las cuales se presentan a continuación:

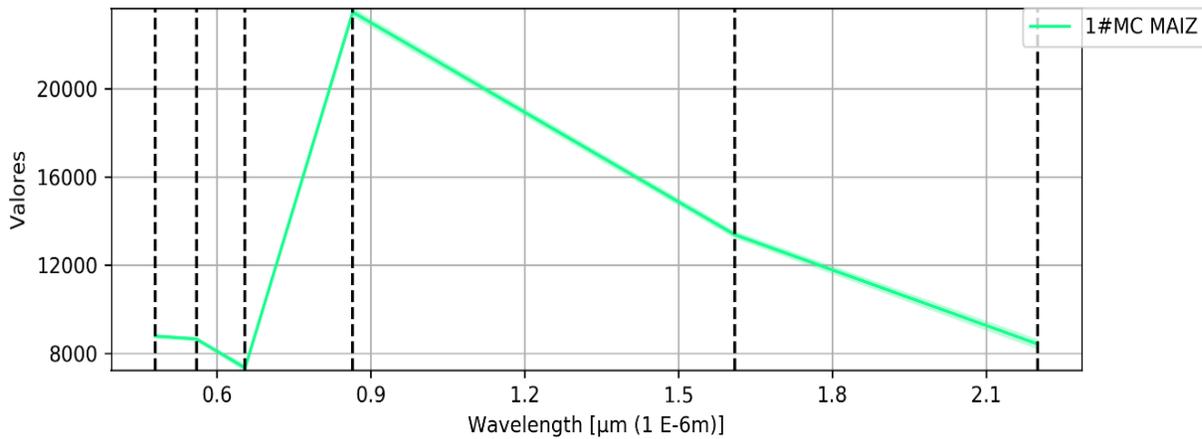


Figura 17. Firma espectral de maíz

Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 33). *Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.*

El gráfico de la firma espectral obtenida para el cultivo de maíz muestra el comportamiento o tendencia típica de una firma espectral de vegetación, ya que presenta los valores más altos en la banda 4 que corresponde a infrarrojo próximo o llamado también infrarrojo cercano y los valores bajos del espectro visible, especialmente en la banda 3 es decir la del color rojo.

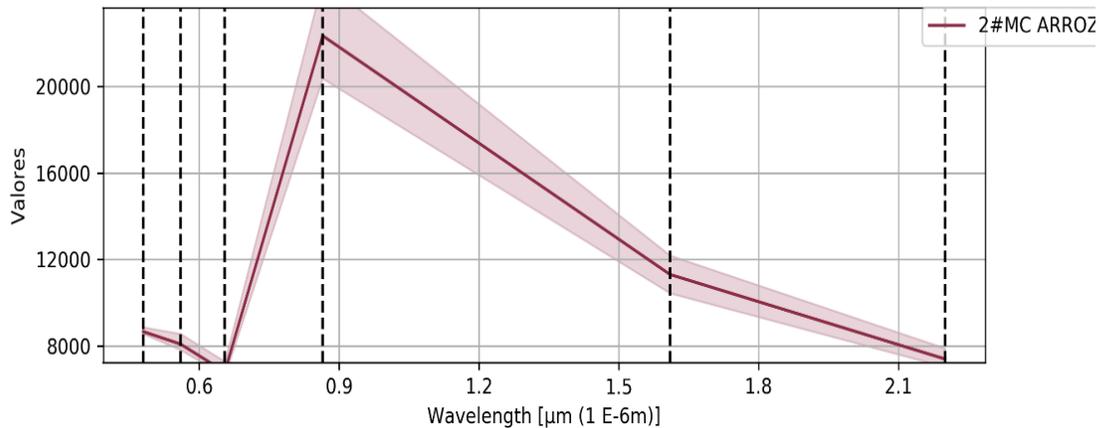


Figura 18. Firma espectral de arroz.

Fuente: Rivas, M.R. et al (2019, p. 34). Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017. El Salvador. Universidad Dr. Andrés Bello.

En el caso del gráfico de la firma espectral del arroz, tiene la misma la forma y tendencia respecto al gráfico de la firma de maíz; los valores máximos se obtuvieron entre las bandas 4 y 5, y los menores en la banda 3; sin embargo, cabe mencionar que las magnitudes en los rangos de valores obtenidos fueron muy inferiores los del arroz con respecto al maíz.

Delimitación de zonas de cultivos

Para delimitar las zonas de cultivo se cargaron las capas de las imágenes clasificadas para cada mes; el paso inicial fue filtrar las capas por cada tipo de cultivo, dando como resultado una nueva capa diferenciada con polígonos específicos de maíz y otra solo con polígonos de arroz; luego estas capa de cada mes se unieron para obtener una capa por cada año y por cada tipo de cultivo; posteriormente se depuraron las capas a través de la función eliminar idénticos con parámetro "shape" y finalmente se hizo un corte de capas por zona geográfica y su respectivo cálculo de área automático. En el caso del cultivo de arroz se hizo un procedimiento extra que fue la intersección de las zonas resultantes con la capa de pendientes menor a seis grados; que como ya se había mencionado es la pendiente máxima en la cual se sugiere se cultive arroz.

Procesamiento de base de datos de parámetros ambientales

Los datos de precipitación proporcionados por el MARN para cada mes, se consolidaron anualmente para cada una de las 23 estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes lugares y por ende con diferente altitud las cuales oscilaron entre los 12 y 1,966 m.s.n.m.; estos cálculos se hicieron en Microsoft Excel y fueron la base para generar un mapa de precipitación.

Métodos de interpolación para datos de lluvia.

Interpolación

Según Román (2013, p.140)

La interpolación es una técnica para obtener superficies continuas a partir de datos puntuales. Puede ser considerada también como una técnica para obtener valores intermedios ubicados entre dos puntos en el espacio. Los nuevos valores dependen de la separación entre los puntos originales y la relación espacial que existe entre las variables consideradas.

De acuerdo a la FAO (2003) citado por Puerta, Rengifo y Bravo (2013, pp. 26 – 29) los métodos más comunes de interpolación son los siguientes:

IDW “Inverse Distance Weighted” (ponderación por distancia)

El método IDW combina el concepto de vecindad entre sitios con disponibilidad de datos con un cambio gradual de las superficies definidas con una tendencia. Se supone que el valor del atributo Z en una posición donde el valor del atributo no es conocido es un promedio de los valores de sus vecinos, pero donde los vecinos más cercanos tienen más peso o importancia que los más alejados.

Splines

La idea de la interpolación segmentaria o por Spline, es que, en vez de usar un solo polinomio para interpolar los datos, se puede usar segmentos de polinomios y unirlos de la mejor forma posible para formar nuestro polinomio de interpolación.

Kriging

Este método pertenece al grupo de los métodos geo-estadísticos ya que describe la correlación tanto espacial como temporal entre los valores de un atributo. Tradicionalmente se ha utilizado en las llamadas geo-ciencias (geofísica, hidrogeología, etc.), sin embargo, sus principios se aplican cada vez más en una amplia variedad de campos científicos como pesquerías, silvicultura, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, meteorología, etc.

Tomando en cuenta esa amplia aplicabilidad que tiene el método Kriging se adoptó este método en el presente estudio, ya que de acuerdo a Fallas y Valverde (2009, p.5); “es un interpolador geoespacial que estima el valor de cada nodo utilizando la totalidad de puntos de muestreo, además esta opción de interpolación representa mejor la influencia de las condiciones locales/regionales en la estimación puntual de la precipitación.”

Aunado a lo anterior, Chartuni y Magdalena (2014) agregan:

La técnica de *kriging* ordinario (KO) ha probado su utilidad y ventaja sobre la mayoría de los métodos de interpolación, las cuales derivan de la capacidad de este método para proveer el mejor estimador no sesgado. Este método de interpolación se denomina *kriging*, en honor a D.G. Krige.

Elaboración de kriging

Este procedimiento se desarrolló con la herramienta de Análisis espacial Kriging de Arcgis, los datos de entrada fueron los valores de precipitación de cada estación meteorológica para cada año en estudio y como capa para delimitar la superficie interpolada se utilizó la de límites departamentales de El Salvador; la ejecución de esta función dio como resultado una imagen raster clasificada en siete categorías diferenciadas por color que van desde el rojo para las zonas con menor precipitación hasta el verde que por el contrario representa las zonas donde hubo mayor cantidad de lluvia anual acumulada.

También a través de la herramienta de análisis espacial, curvas a nivel de Arcgis se tomó como base el kriging, para obtener las isoyetas las cuales fueron calculadas con un intervalo de 100 mm.

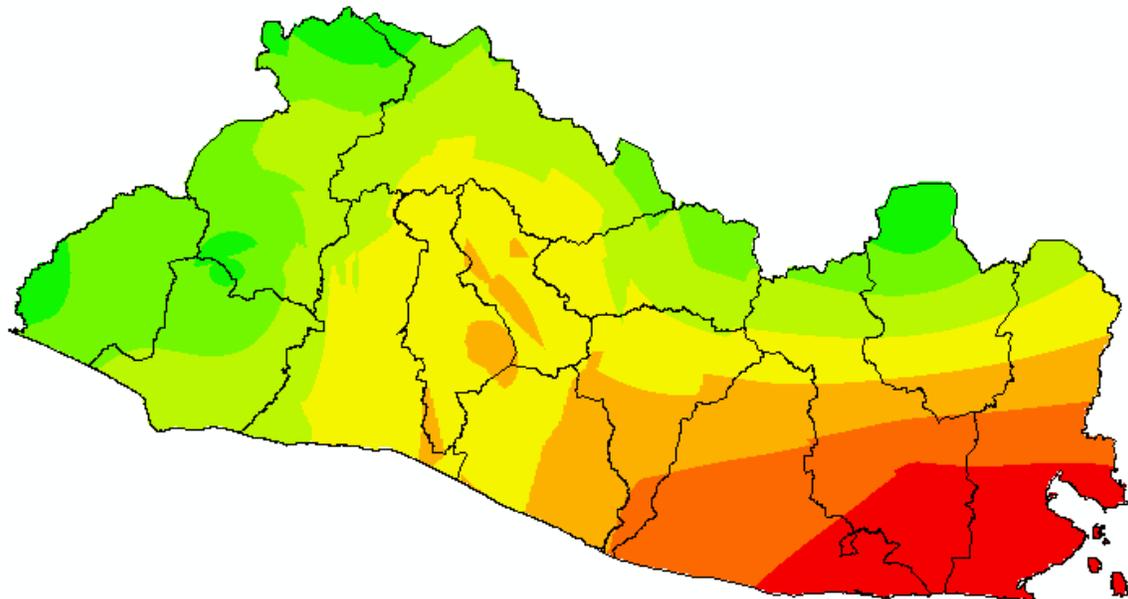
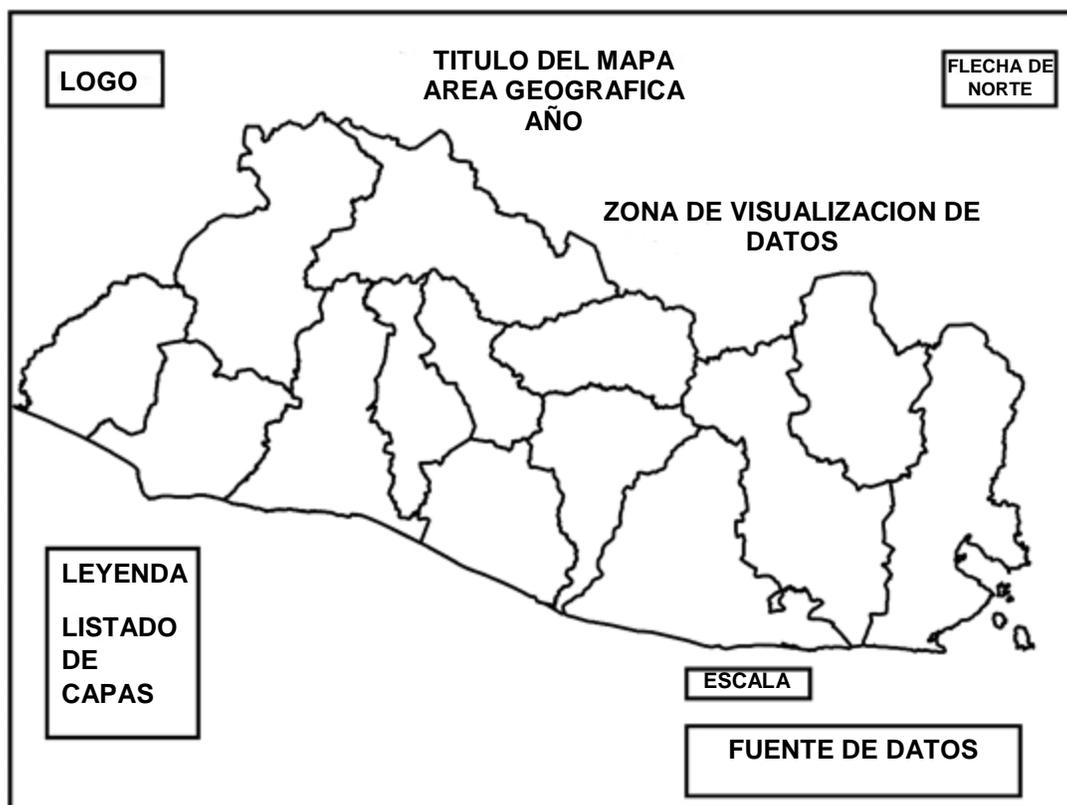


Figura 19. Kriging correspondiente a datos de precipitación 2018.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Elaboración de mapas

Una vez que se contó con todos los insumos para la producción cartográfica de esta investigación se procedió a diseñar un mapa base para toda la cartografía digital, la cual incluye todos los elementos principales de un mapa estático y tiene el siguiente formato:



*Figura 20. Mapa base de cartografía digital.
Fuente: Elaboración propia.*

Descripción de elementos del mapa base:

Título del mapa: en esta parte se especifica el tipo de mapa que puede ser de estimación de zona de cultivo de maíz o zona de cultivo de arroz o de precipitación; también incluye la zona geográfica que delimita el alcance espacial, para este caso la Zona Central; en este apartado también se detalla el alcance temporal del mapa para ello se muestra el año en formato de cuatro dígitos para el cual fue elaborado.

Leyenda: muestra el listado de las capas de datos contenidas en el mapa detallando su simbología que puede ser líneas para datos o polígonos, cada una

diferenciadas por color que de acuerdo a su intensidad hace referencia a la magnitud del dato representado.

Escala: representa la equivalencia entre una unidad de área del mapa en el territorio. La escala utilizada en la Zona Central fue 1: 800,000.

Fuente de datos: En esta sección se hizo referencia a la(s) institución(es) que proveyeron los datos originales como fueron el MARN y el CNR.

Descripción de mapas elaborados

El paso inicial del procesamiento fue cargar las capas dependiendo del tipo de mapa: zona de cultivo, kriging de precipitación, isoyetas, cuerpos de agua y límites departamentales; posteriormente se agregaron cada uno de los elementos del mapa antes descrito en la plantilla y finalmente se exportó cada mapa en formato de imagen (PNG); a continuación, se detalla el contenido de cada tipo de mapa elaborado en la presente investigación.

Mapa de zonas de cultivo de maíz y arroz: este mapa contiene la distribución espacial del conjunto de polígonos que conforman la superficie agrícola para ambos cultivos estudiado, estas capas requirieron del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat que dieron como resultado la delimitación de los polígonos que representan las superficies agrícolas tanto a nivel nacional como por cada zona geográfica y para cada año en estudio.

Mapa de precipitación: presenta una distribución de la interpolación de datos de precipitación de las 23 estaciones meteorológicas, incluye una capa de isoyetas que fue elaborada a partir de la utilización de los datos de precipitación acumulada anual para cada estación meteorológica, para el período 2013-2018.

Desarrollo de aplicación en Arcgis Online

Como resultado final de la investigación se desarrolló una aplicación web que concentra de forma resumida la información tanto de las capas de áreas de cultivo como precipitación en un ambiente interactivo; cabe mencionar que esta aplicación estará disponible mientras esté vigente la suscripción empresarial al portal de Arcgis Online ya que es ahí donde está alojada.

4. Resultados

A continuación, se presenta la cartografía digital estática por año y por zona geográfica.

4.1 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2013



Mapa de Precipitación
Zona Central
Año 2013

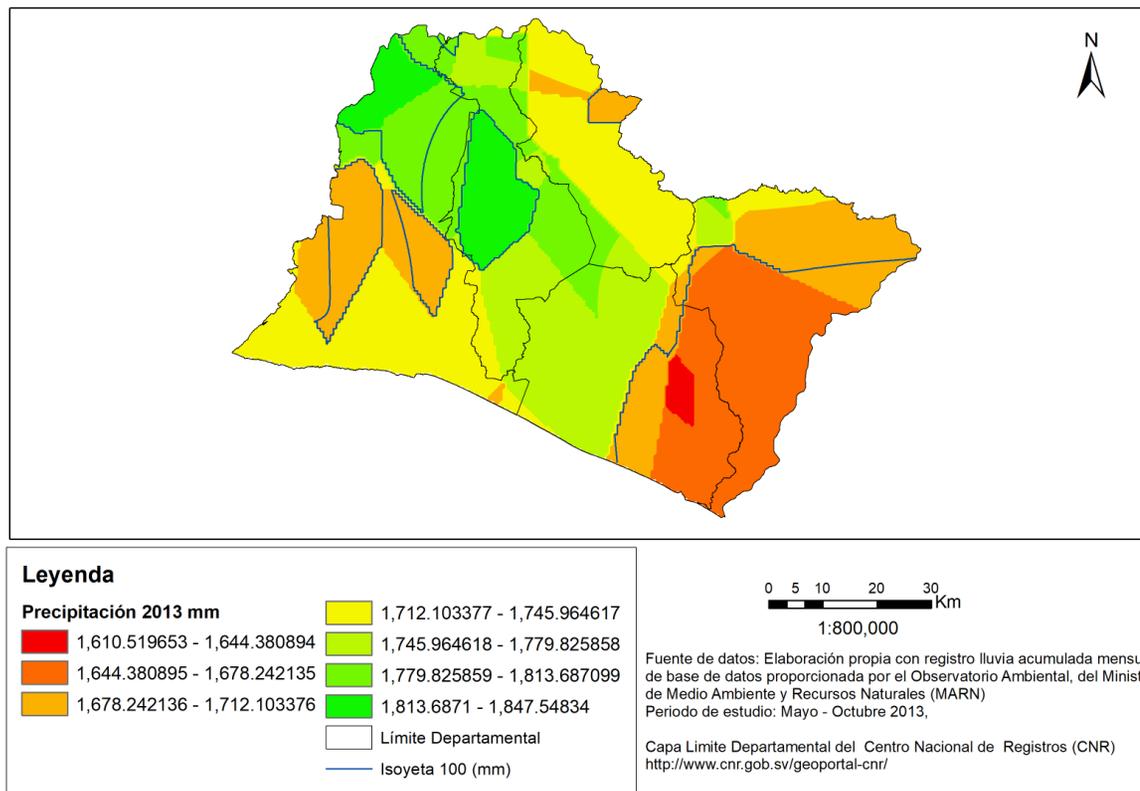
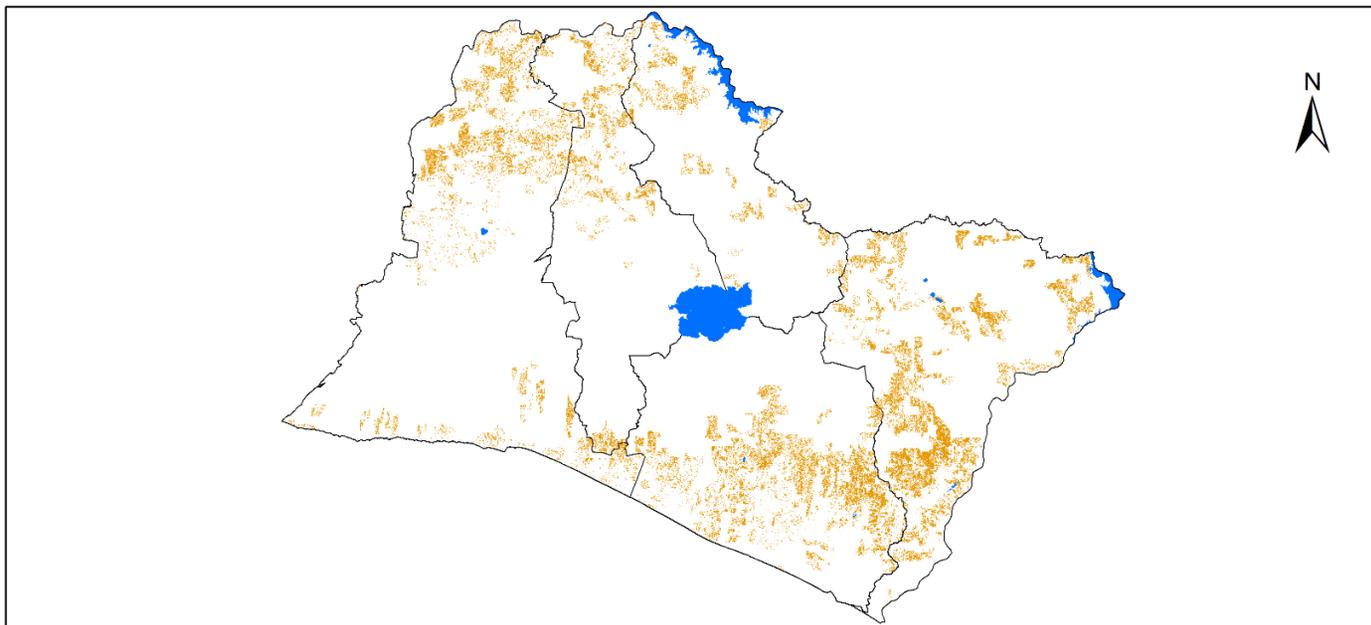


Figura 21. Mapa de precipitación, zona central, año 2013.

Fuente: Elaboración propia.

**Área estimada cultivo de maíz
Zona Central
Año 2013**



0 5 10 20 30 Km

1:800,000

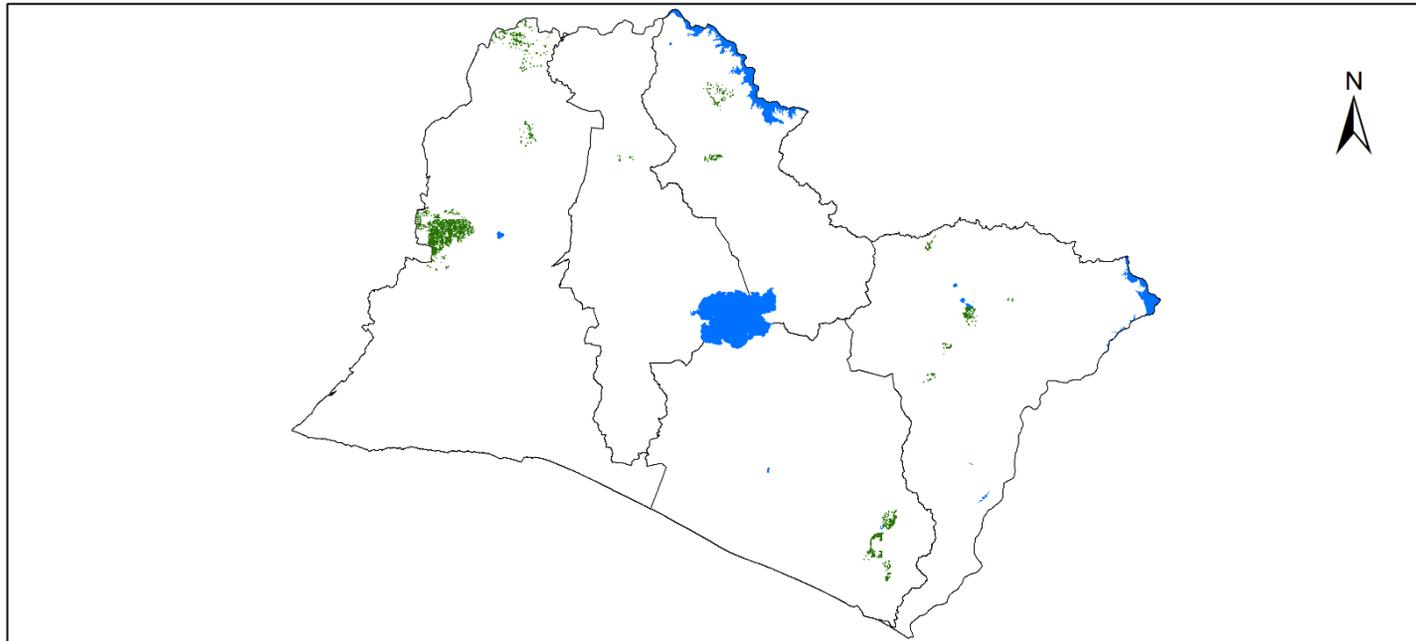
Leyenda

-  Área estimada de cultivo de maíz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

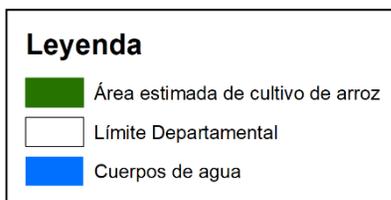
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 22. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2013.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de arroz
Zona Central
Año 2013



0 5 10 20 30 Km
1:800,000



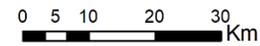
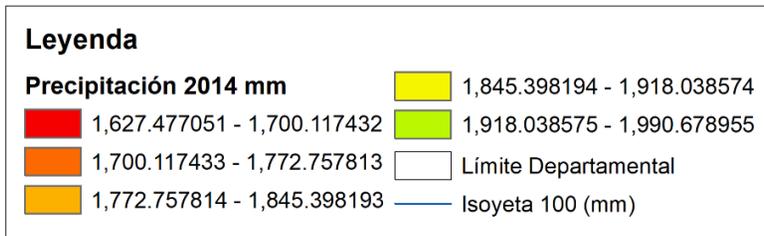
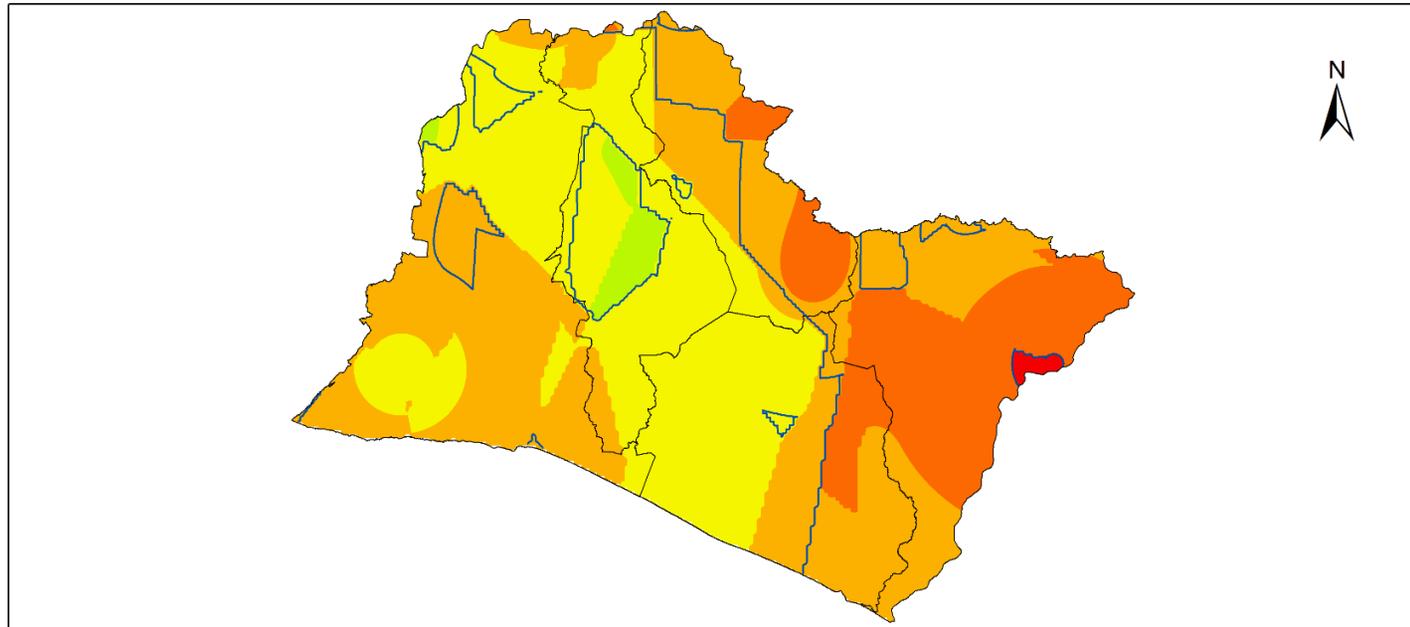
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 23. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2013.
Fuente: Elaboración propia.

4.2 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2014



Mapa de Precipitación Zona Central Año 2014



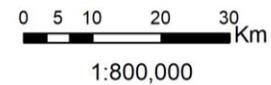
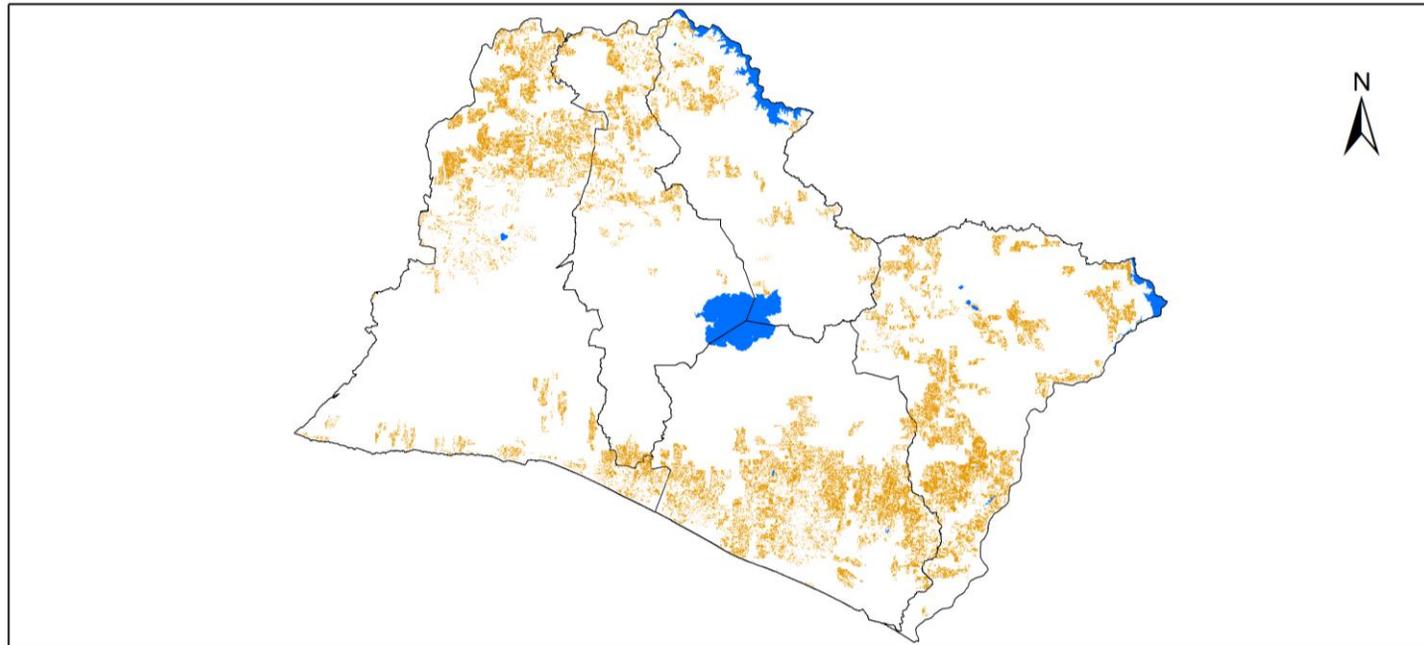
1:800,000

Fuente de datos: Elaboración propia con registro lluvia acumulada mensual de base de datos proporcionada por el Observatorio Ambiental, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Periodo de estudio: Mayo - Octubre 2014,

Capa Limite Departamental del Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 24. Mapa de precipitación, zona central, año 2014.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de maíz
Zona Central
Año 2014



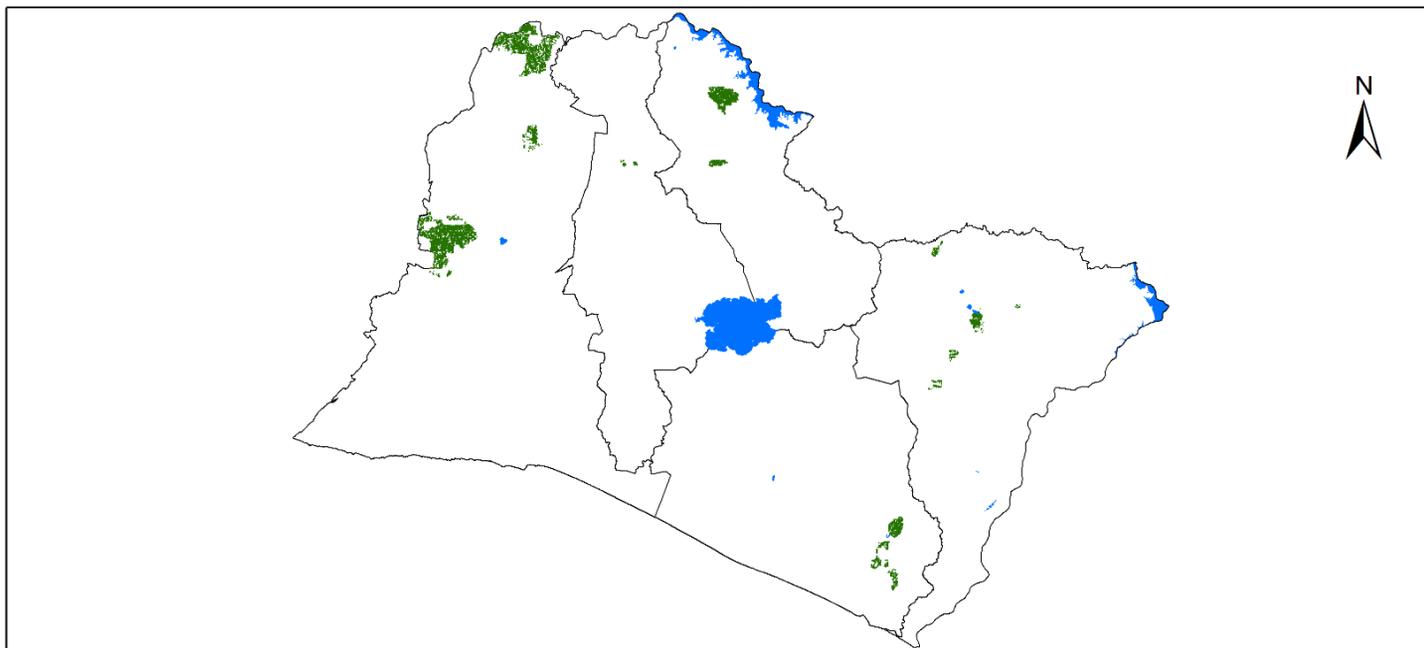
Leyenda

-  Área estimada de cultivo de maíz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

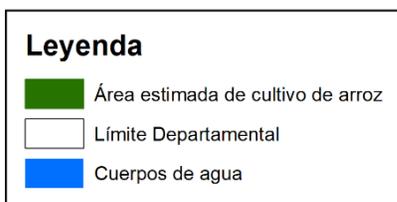
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 25. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2014.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de arroz
Zona Central
Año 2014



0 5 10 20 30 Km
1:800,000



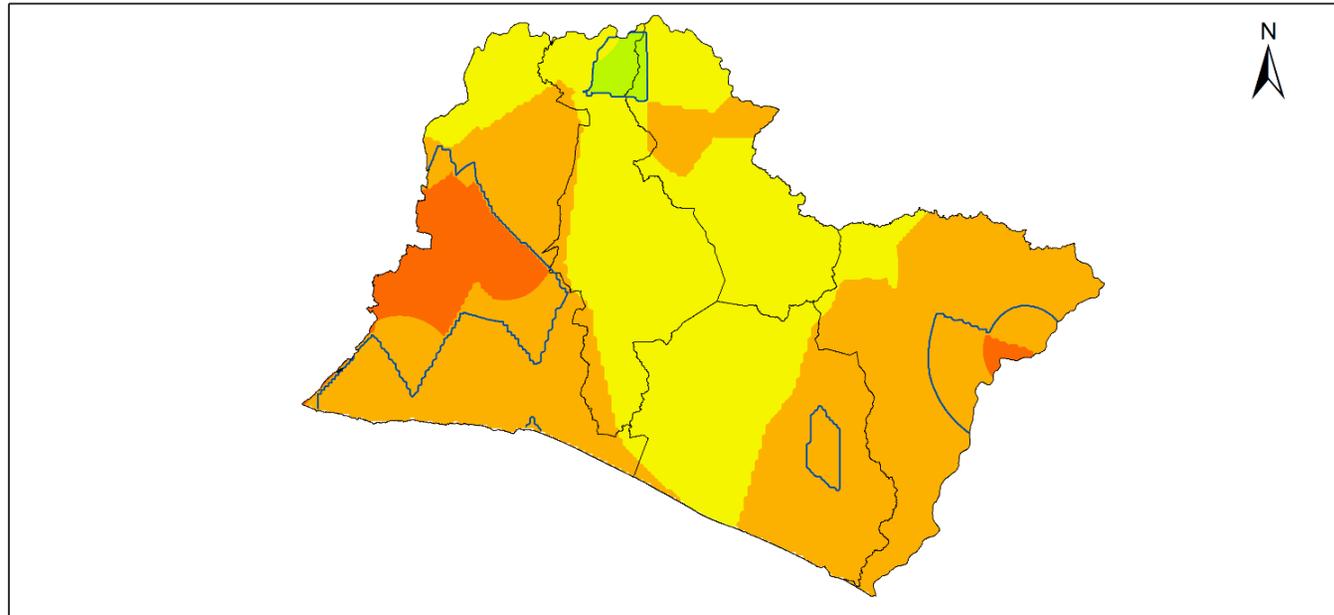
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 26. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2014.
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2015



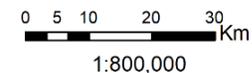
Mapa de Precipitación Zona Central Año 2015



Leyenda

Precipitación 2015 mm

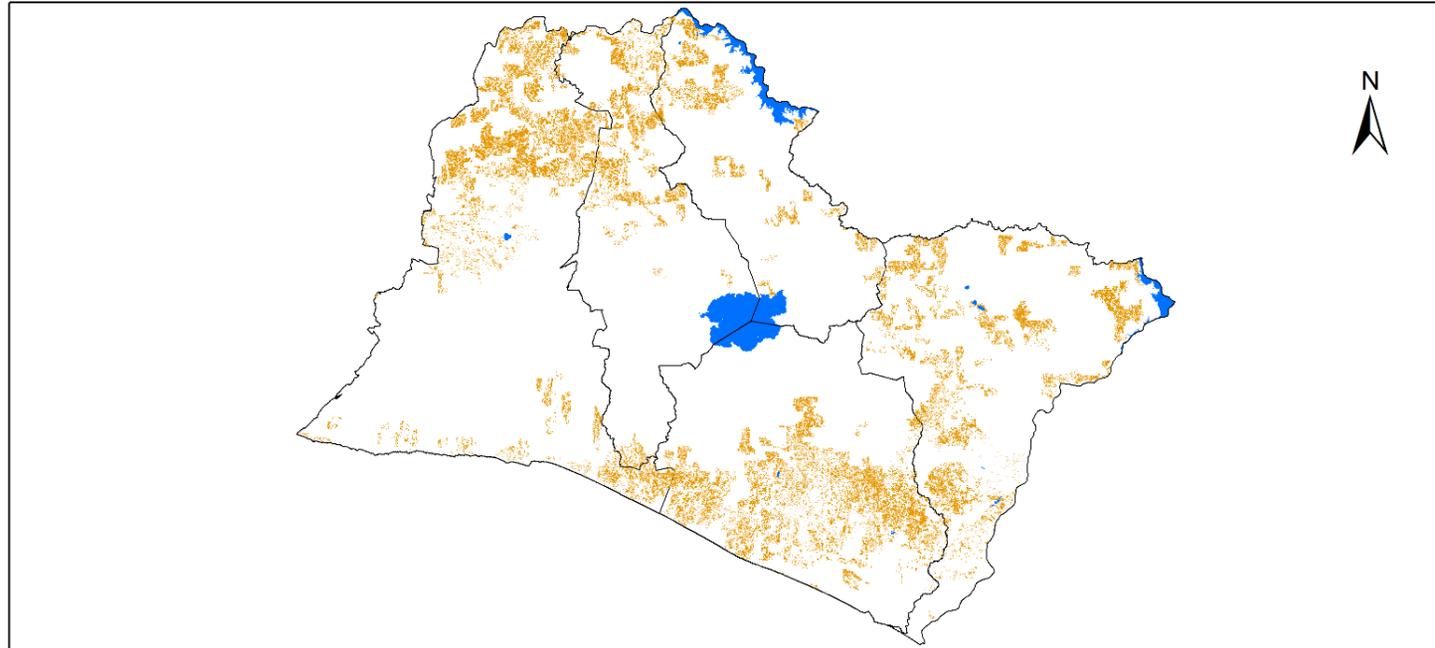
 1,316.267474 - 1,379.146153	 1,504.903513 - 1,567.782192
 1,379.146154 - 1,442.024833	 Límite Departamental
 1,442.024834 - 1,504.903512	 Isoyeta 100 (mm)



Fuente de datos: Elaboración propia con registro lluvia acumulada mensual de base de datos proporcionada por el Observatorio Ambiental, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Periodo de estudio: Mayo - Octubre 2015,
Capa Límite Departamental del Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 27. Mapa de precipitación, zona central, año 2015.
Fuente: Elaboración propia.

Área estimada cultivo de maíz
Zona Central
Año 2015



0 5 10 20 30 Km

1:800,000

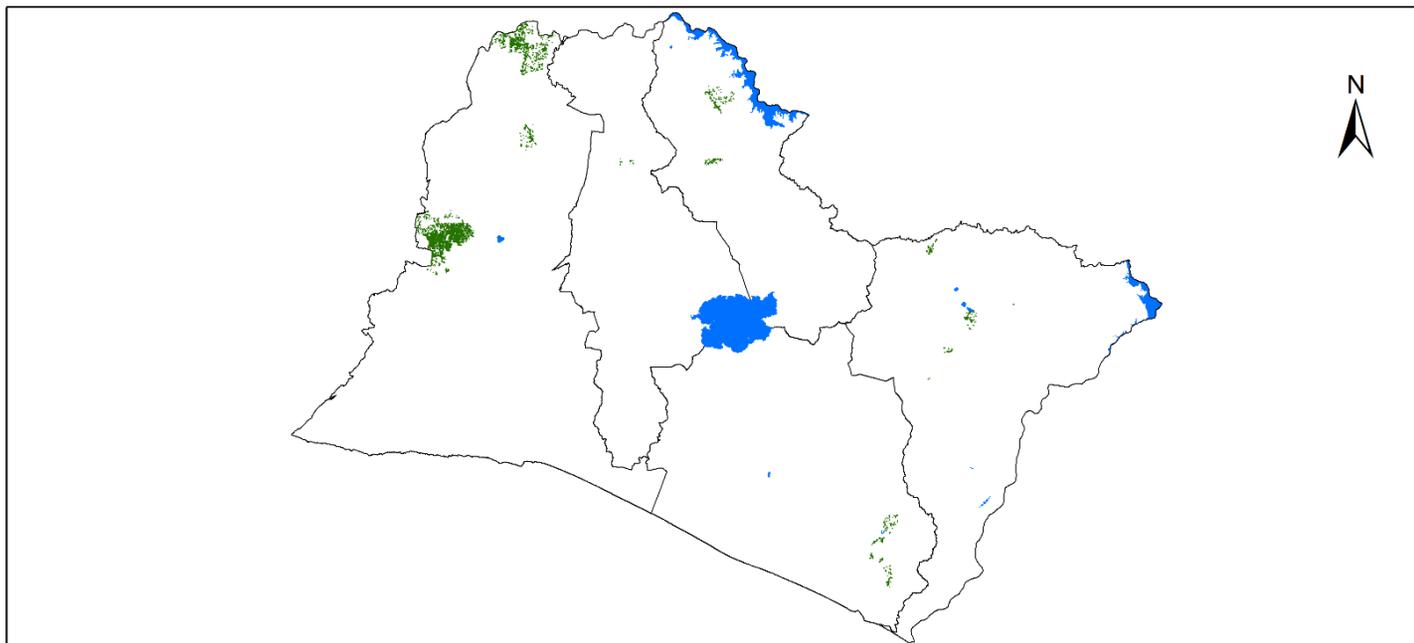
Leyenda

-  Área estimada de cultivo de maíz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

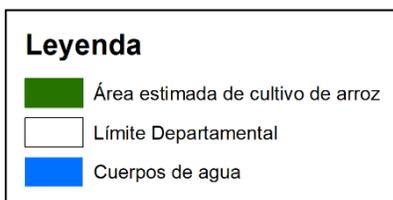
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 28. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2015.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de arroz
Zona Central
Año 2015



0 5 10 20 30 Km
1:800,000



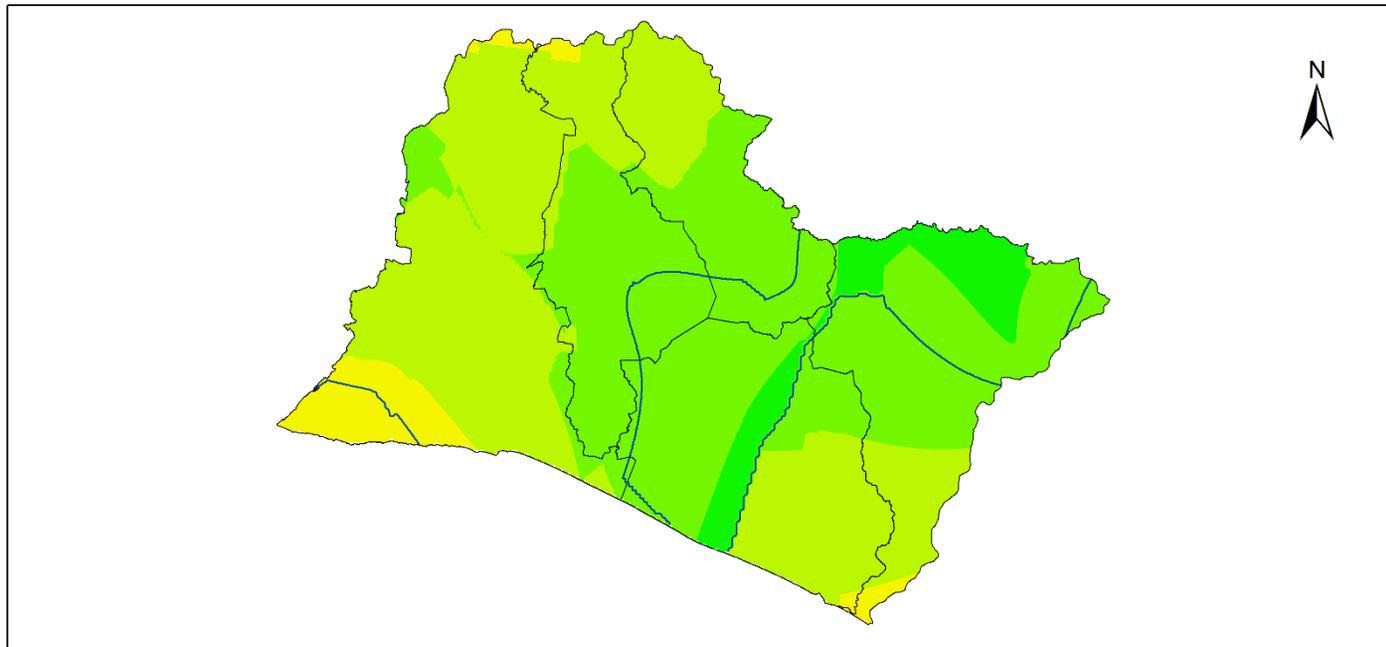
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 29. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2015.
Fuente: Elaboración propia.

4.4 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2016



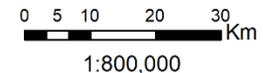
Mapa de Precipitación Zona Central Año 2016



Leyenda

Precipitación 2016 mm

 1,359.630913 - 1,411.730294	 1,515.929061 - 1,568.028442
 1,411.730295 - 1,463.829677	 Límite Departamental
 1,463.829678 - 1,515.92906	 Isoyeta 100 (mm)

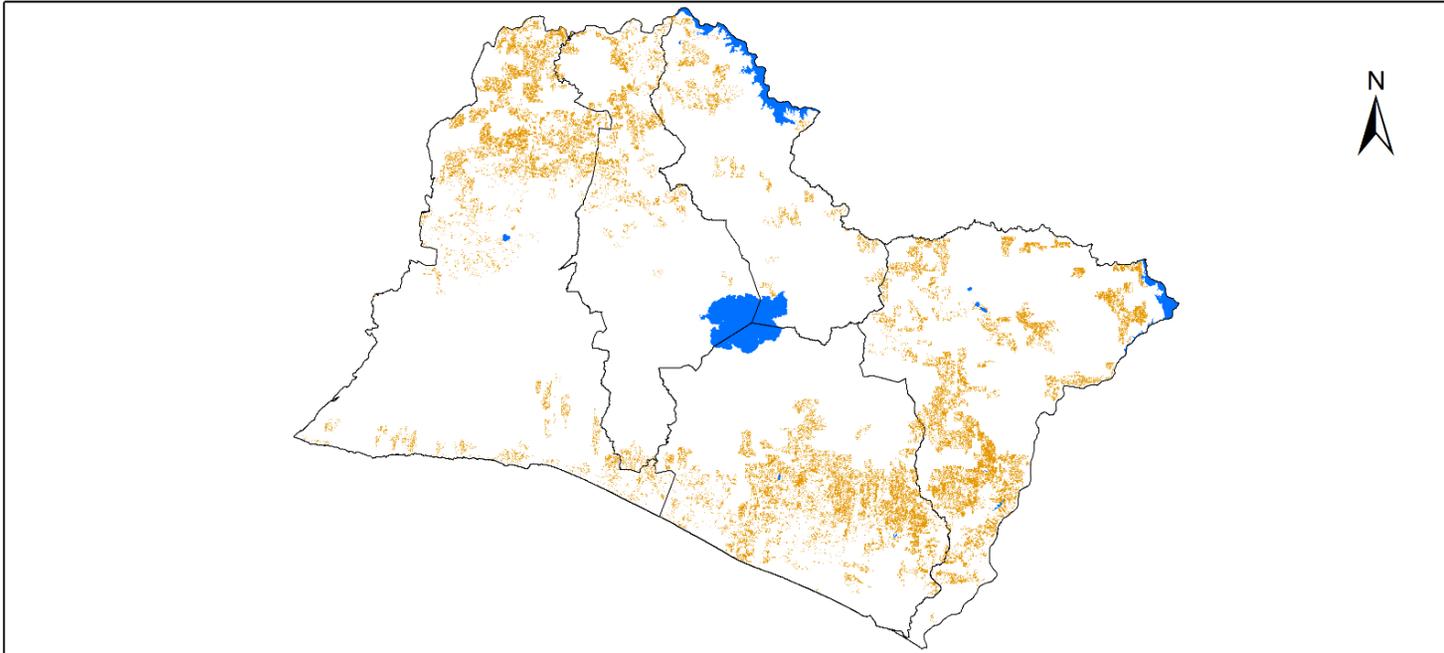


Fuente de datos: Elaboración propia con registro lluvia acumulada mensual de base de datos proporcionada por el Observatorio Ambiental, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Periodo de estudio: Mayo - Octubre 2016.

Capa Limite Departamental del Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 30. Mapa de precipitación, zona central, año 2016.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de maíz
Zona Central
Año 2016



0 5 10 20 30 Km

1:800,000

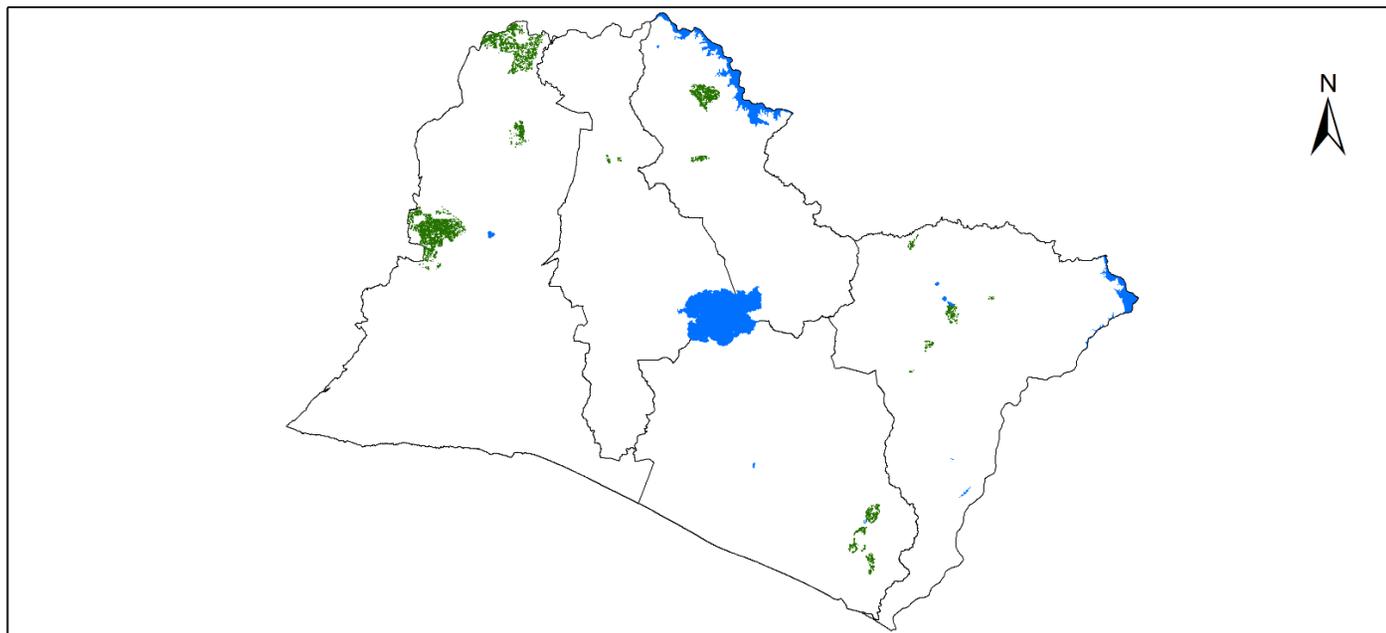
Leyenda

-  Área estimada de cultivo de maíz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 31. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2016.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de arroz
Zona Central
Año 2016



0 5 10 20 30 Km
1:800,000

Leyenda

-  Área estimada de cultivo de arroz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 32. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2016.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2017



Mapa de Precipitación Zona Central Año 2017

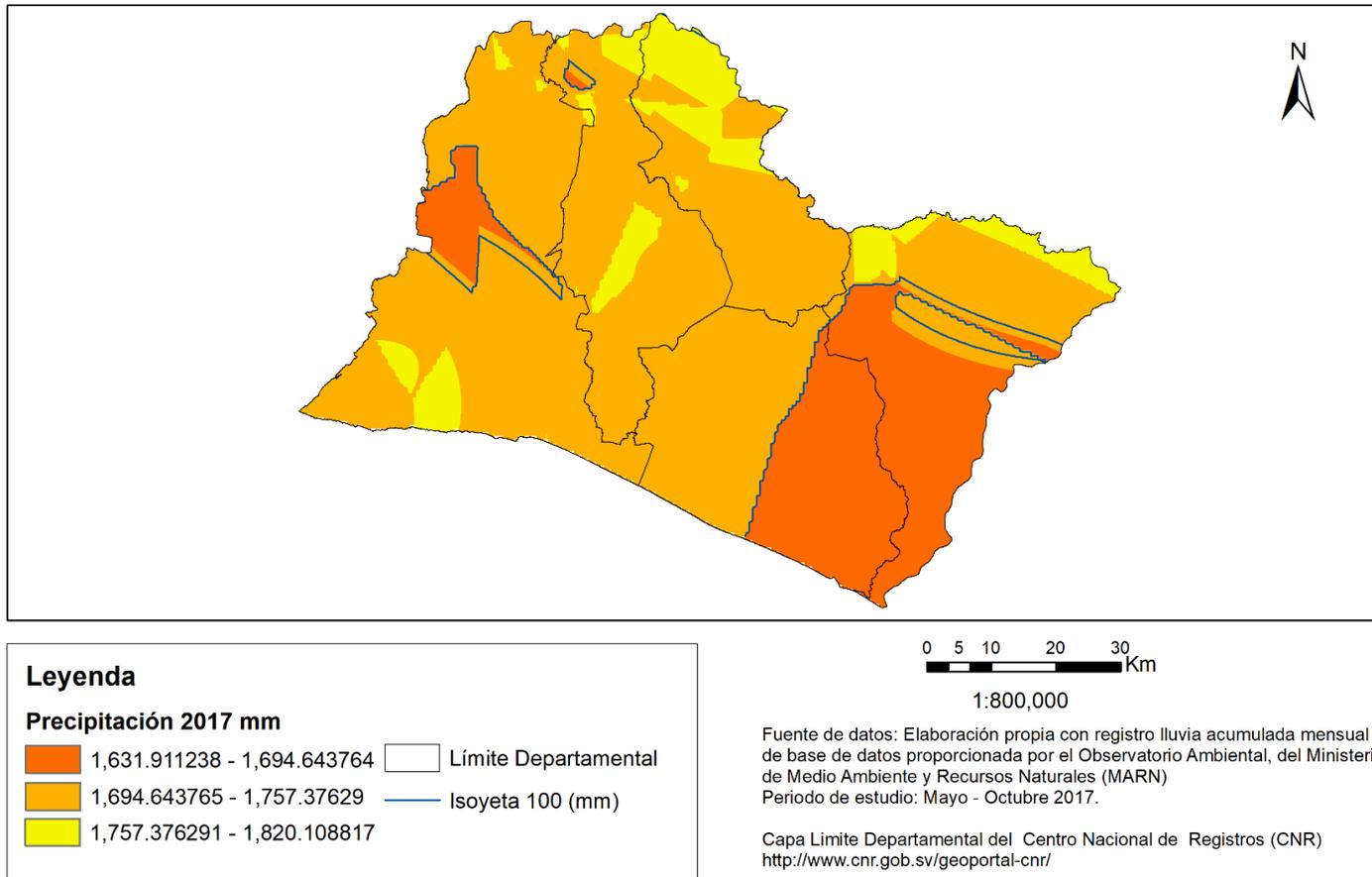
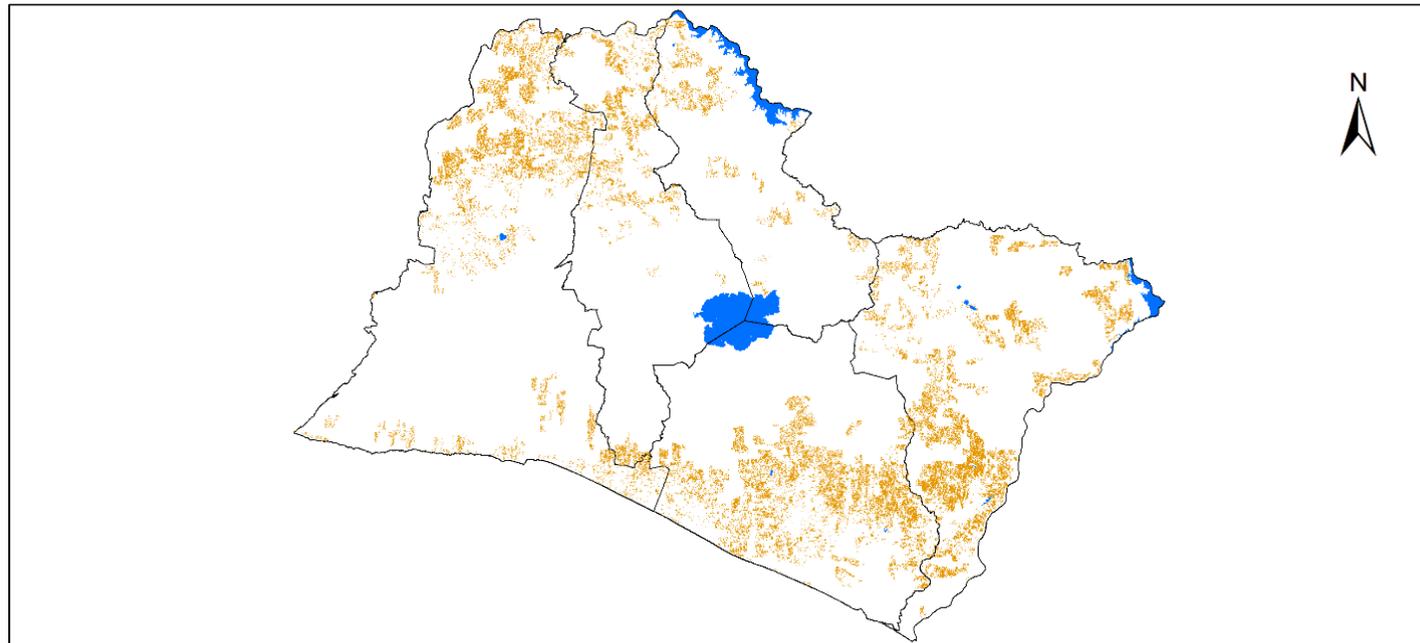


Figura 33. Mapa de precipitación, zona central, año 2017.
Fuente: Elaboración propia.

Área estimada cultivo de maíz
Zona Central
Año 2017



0 5 10 20 30 Km

1:800,000

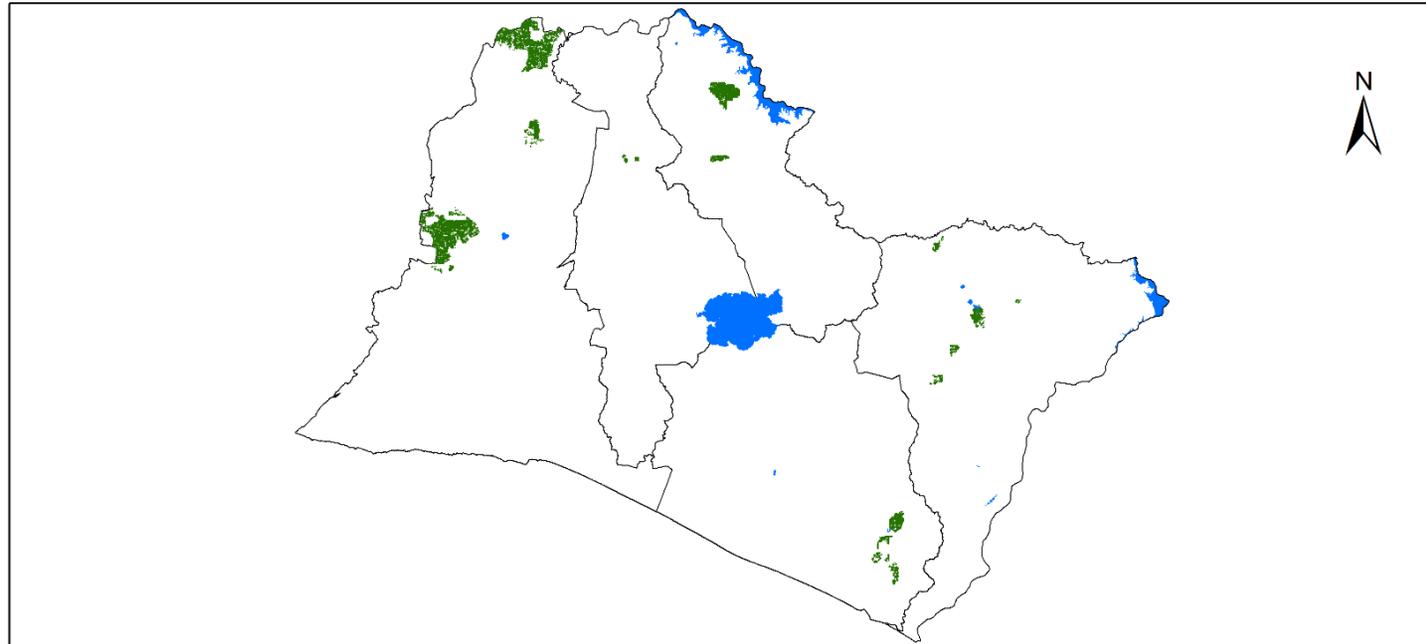
Legenda

-  Área estimada de cultivo de maíz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

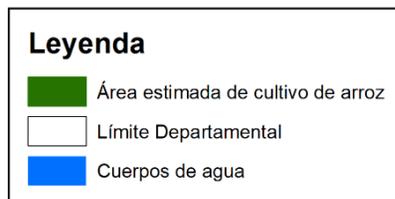
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 34. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2017.
Fuente: Elaboración propia.*

Área estimada cultivo de arroz
Zona Central
Año 2017



0 5 10 20 30 Km
1:800,000



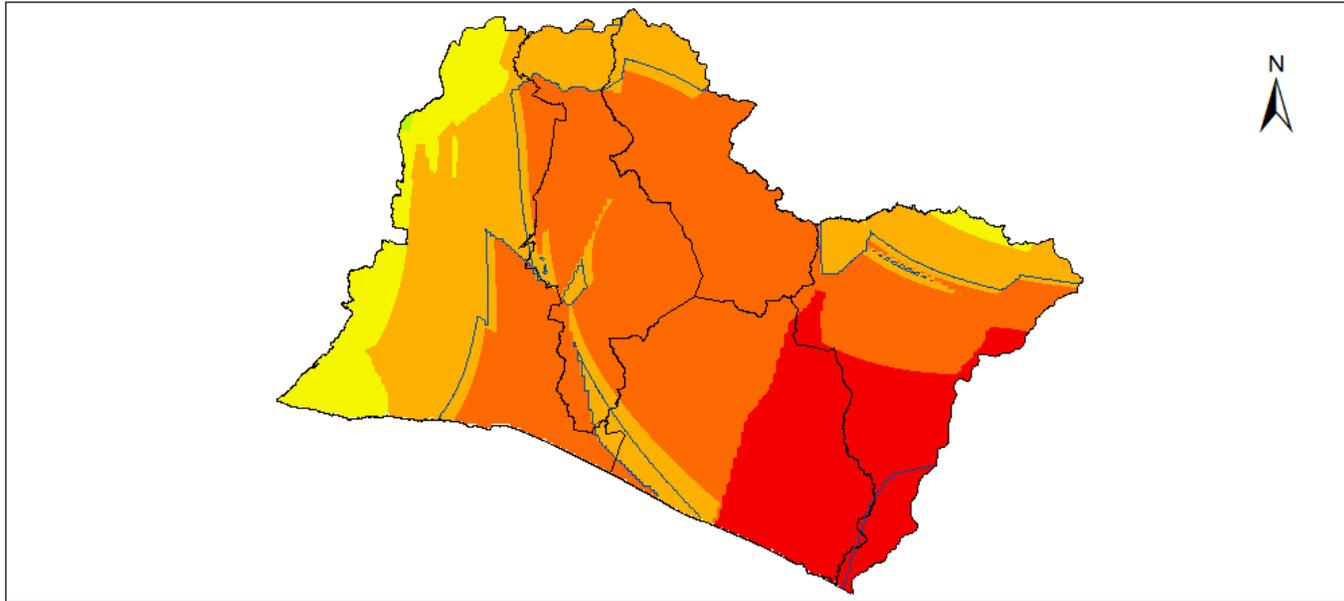
Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 35. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2017.
Fuente: Elaboración propia.

4.6 Cartografía Zona Central correspondiente al año 2018



Mapa de Precipitación Zona Central Año 2018



0 5 10 20 30 Km

1:800,000

Leyenda

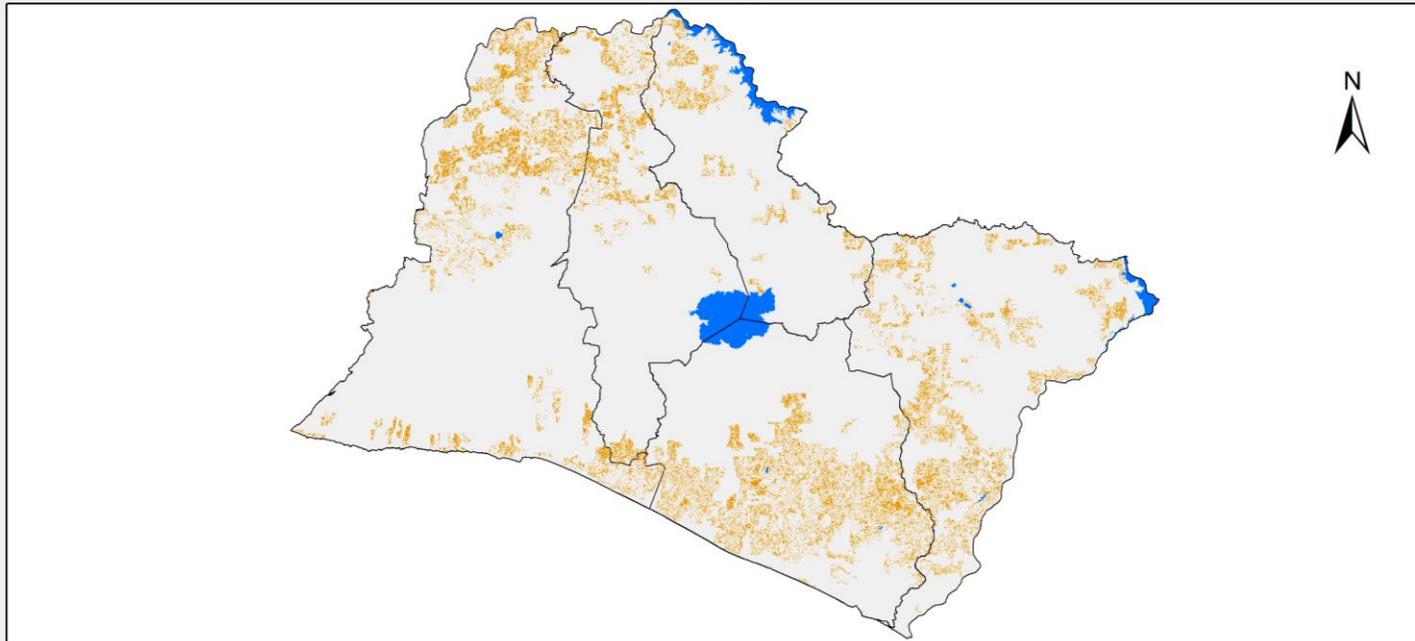
Precipitación 2018 mm	
	1,635.172093 - 1,676.046388
	1,506.162598 - 1,553.423502
	1,553.423503 - 1,595.575119
	1,595.57512 - 1,635.172092
	Límite Departamental
	Isoyeta 100 (mm)

Fuente de datos: Elaboración propia con registro lluvia acumulada mensual de base de datos proporcionada por el Observatorio Ambiental, del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
Periodo de estudio: Mayo - Octubre 2018.

Capa Limite Departamental del Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

Figura 36. Mapa de precipitación, zona central, año 2018.
Fuente: Elaboración propia.

Área estimada cultivo de maíz
Zona Central
Año 2018



0 5 10 20 30 Km
1:800,000

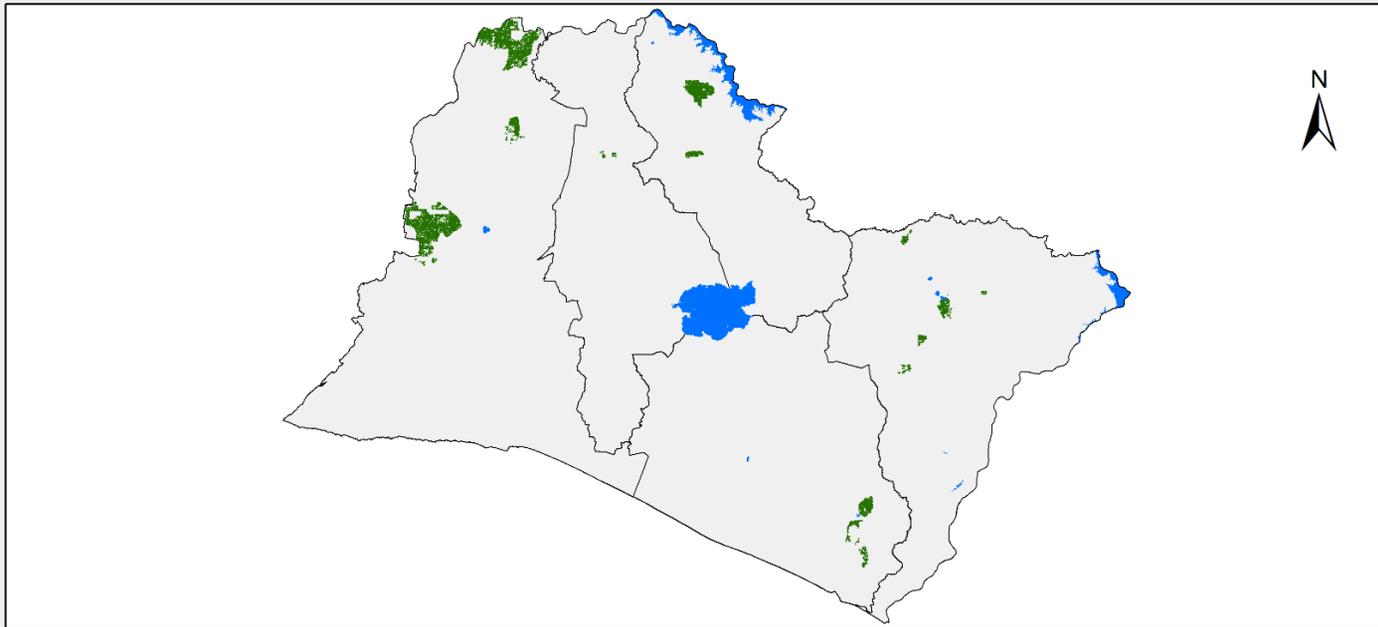
Leyenda

-  Área estimada de cultivo de maíz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportel-cnr/>

Figura 37. Mapa de áreas estimadas de cultivo de maíz, zona central, año 2018.
Fuente: Elaboración propia.

Área estimada cultivo de arroz
Zona Central
Año 2018



Leyenda

-  Área estimada de cultivo de arroz
-  Límite Departamental
-  Cuerpos de agua

0 5 10 20 30 Km

1:800,000

Fuente de datos: Elaboración propia
Capas: Límite Departamental y Lagos del
Centro Nacional de Registros (CNR)
<http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

*Figura 38. Mapa de áreas estimadas de cultivo de arroz, zona central, año 2018.
Fuente: Elaboración propia.*

4.7 Resultados de variación multianual en áreas de cultivos

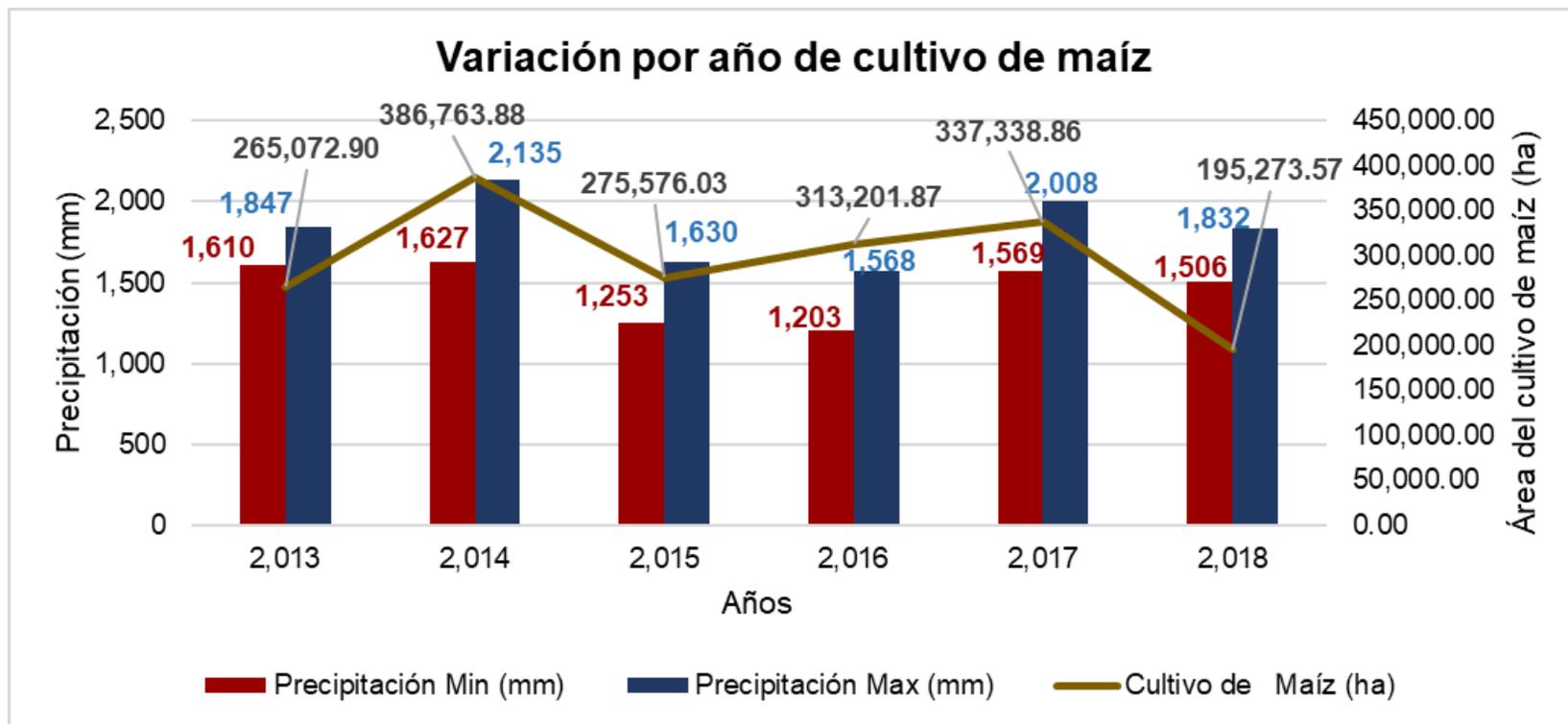
4.7.1 Variación en áreas de cultivo a nivel nacional

Tabla 4. Variación en áreas de cultivo de maíz y arroz a nivel nacional.

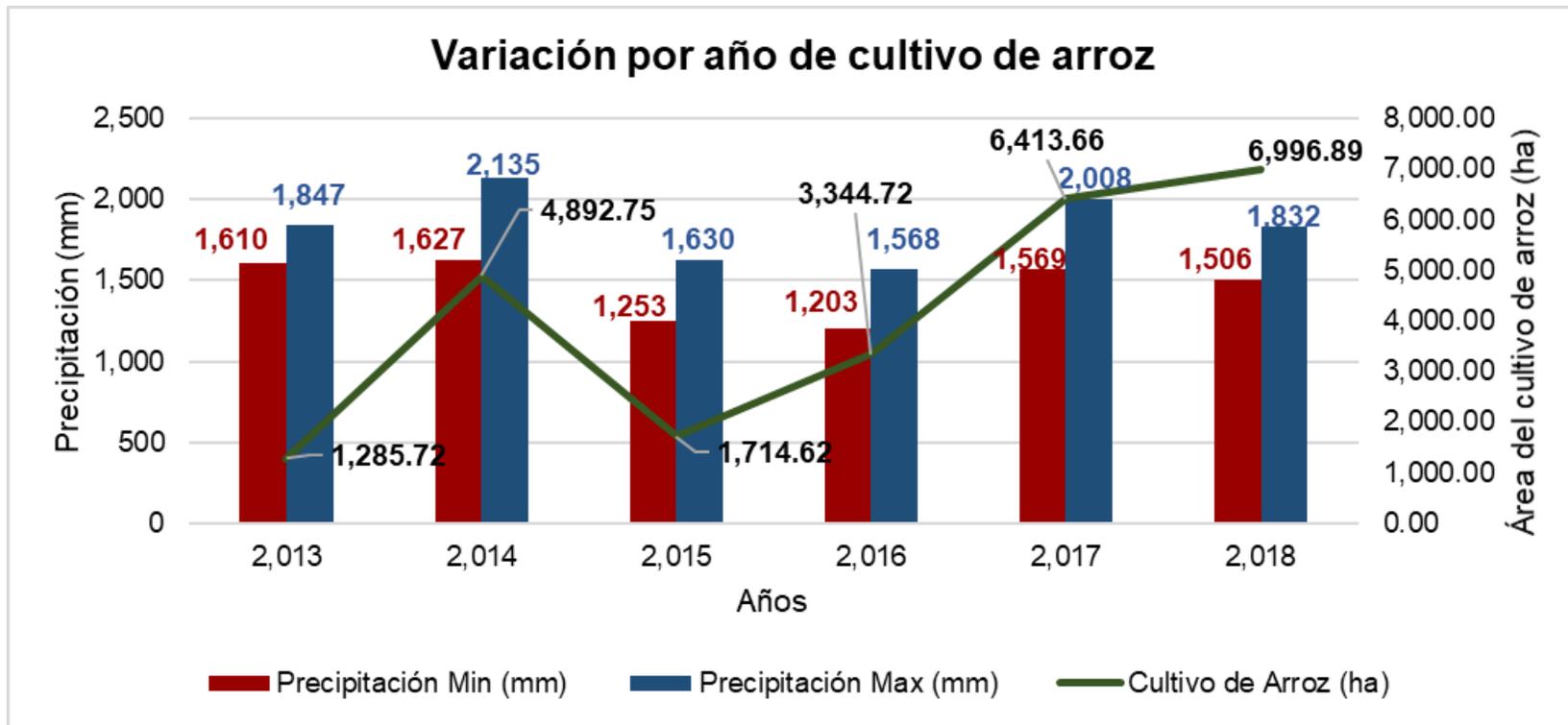
Año	Precipitación Mínima (mm)	Precipitación Máxima (mm)	Precipitación Promedio (mm)	Variación de precipitación (mm)	Cultivo de Maíz (ha)	Variación (ha)	Cultivo de Arroz (ha)	Variación (ha)
2013	1,610	1,847	1,729		265,072.90		1,285.72	
2014	1,627	2,135	1,881	153	386,763.88	121,690.98	4,892.75	3,607.03
2015	1,253	1,630	1,442	-440	275,576.03	-111,187.85	1,714.62	-3,178.13
2016	1,203	1,568	1,386	-56	313,201.87	37,625.84	3,344.72	1,630.10
2017	1,569	2,008	1,789	403	337,338.86	24,137.00	6,413.66	3,068.94
2018	1,506	1,832	1,669	120	195,273.57	142,065.29	6,996.89	583.24

Nota: mm: milímetros, ha: hectáreas

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 39. Variación por año de cultivo de maíz a nivel nacional.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 40. Variación por año de cultivo de arroz a nivel nacional.
Fuente: Elaboración propia.*

4.7.2 Variación en áreas de cultivo Zona Central

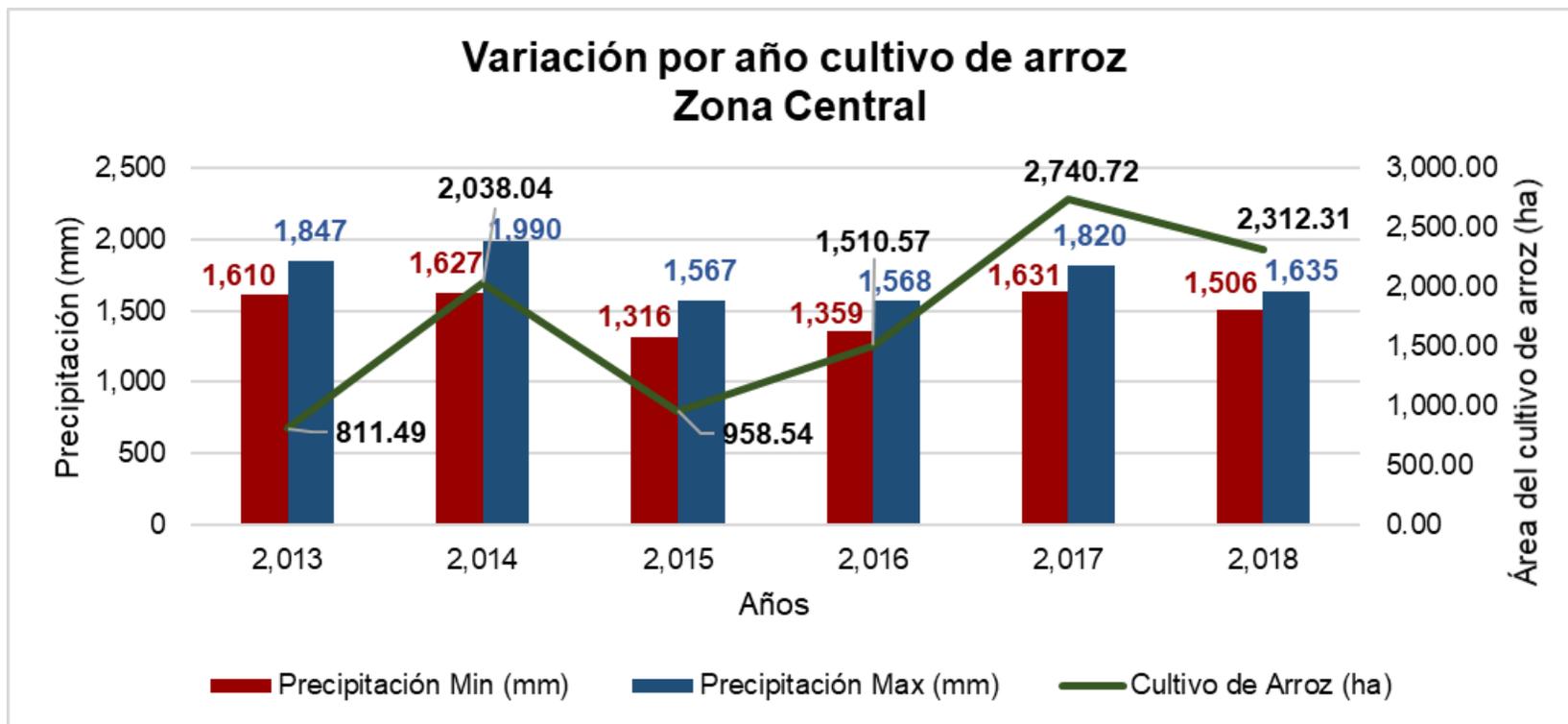
Tabla 5. Variación en áreas de cultivo de maíz y arroz, zona central.

Año	Precipitación Mínima (mm)	Precipitación Máxima (mm)	Precipitación Promedio (mm)	Variación de precipitación (mm)	Cultivo de Maíz (ha)	Variación (ha)	Cultivo de Arroz (ha)	Variación (ha)
2,013	1,610	1,847	1,729		56,119.75		811.49	
2,014	1,627	1,990	1,809	80	79,918.47	23,798.72	2,038.04	1,226.55
2,015	1,316	1,567	1,442	-367	78,542.07	-1,376.40	958.54	-1,079.50
2,016	1,359	1,568	1,464	22	59,483.59	-19,058.48	1,510.57	552.04
2,017	1,631	1,820	1,726	262	66,508.04	7,024.45	2,740.72	1,230.14
2,018	1,506	1,635	1,571	-155	45,860.23	-20,647.81	2,312.31	-428.41

*Nota: mm: milímetros, ha: hectáreas
Elaboración propia.*



Figura 41. Variación por año de cultivo de maíz, zona central.
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 42. Variación por año de cultivo de arroz, zona central.
Fuente: Elaboración propia.*

4.8 Aplicación en ArcGIS Online

La aplicación desarrollada se conoce como cuadro de mando, la cual sirve para monitorizar eventos mostrando varias visualizaciones en una sola pantalla. El cuadro de mando diseñado está compuesto por mapas web y gráficos tanto de barra como circulares y su principal utilidad es mostrar las tendencias de datos de precipitación y estimación de superficies de cultivo para todo el periodo de estudio mostrando un historial de estos.

La aplicación fue desarrollada en Arcgis Online y está alojada en la siguiente url: <http://unab.maps.arcgis.com/apps/opsoashboard/index.html#/fa20b8d3c289425eac7fd41cc21ed216>, la cual estará disponible mientras esté vigente la suscripción empresarial a la plataforma.

A continuación, se presenta la descripción de cada sección que conforma la aplicación:

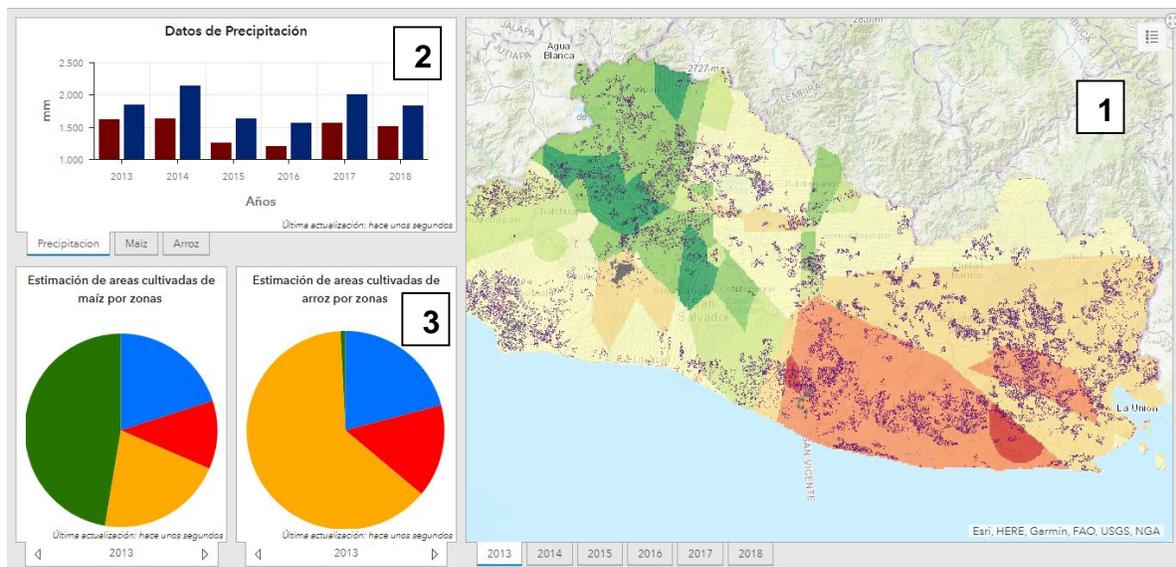


Figura 43. Pantalla principal.

Sección de mapas web (1)

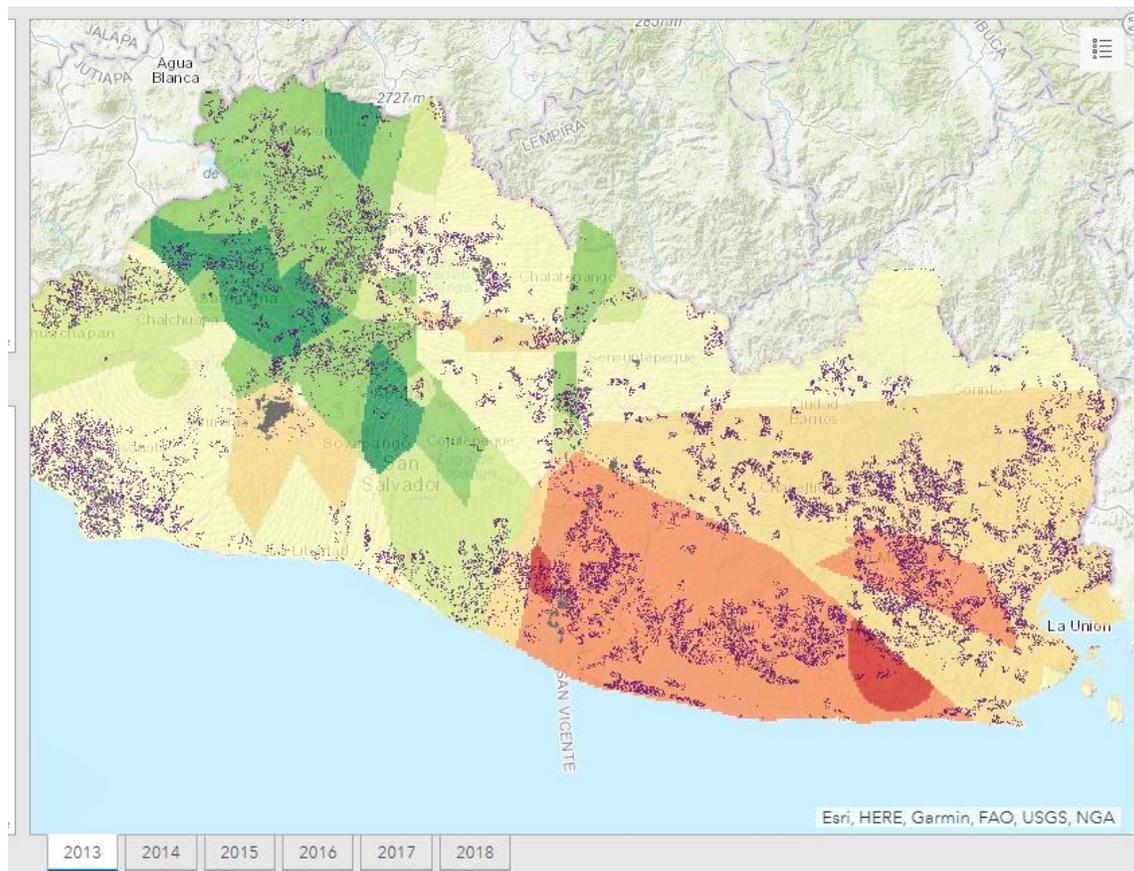


Figura 44. Sección de mapas web.

Está conformada por seis mapas web uno para cada año de estudio; el cual contiene una visualización integrada de los datos de precipitación diferenciados por una escala de colores que va desde el rojo para los valores mínimos hasta el verde para los valores máximos; de igual forma presenta la superficie de arroz con polígonos en color gris y la de maíz con polígonos en color violeta. En la parte inferior se encuentra seis pestañas, una para cada año; las cuales sirven para cambiar la vista del mapa en pantalla; al hacer clic sobre la pestaña aparecerá una línea en color azul en la parte inferior indicando el año para el cual está activa la vista del mapa.

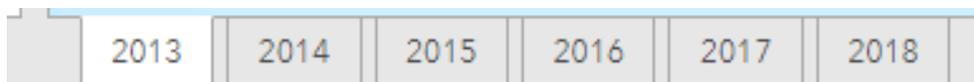


Figura 45. Lista de pestañas para cambio de cada mapa web por año.

Otro elemento de esta sección es la leyenda que detalla la simbología aplicada en cada mapa; para mostrar u ocultar la leyenda haga clic en el botón de la esquina superior derecha, la leyenda de cada mapa muestra un recuadro como el siguiente:

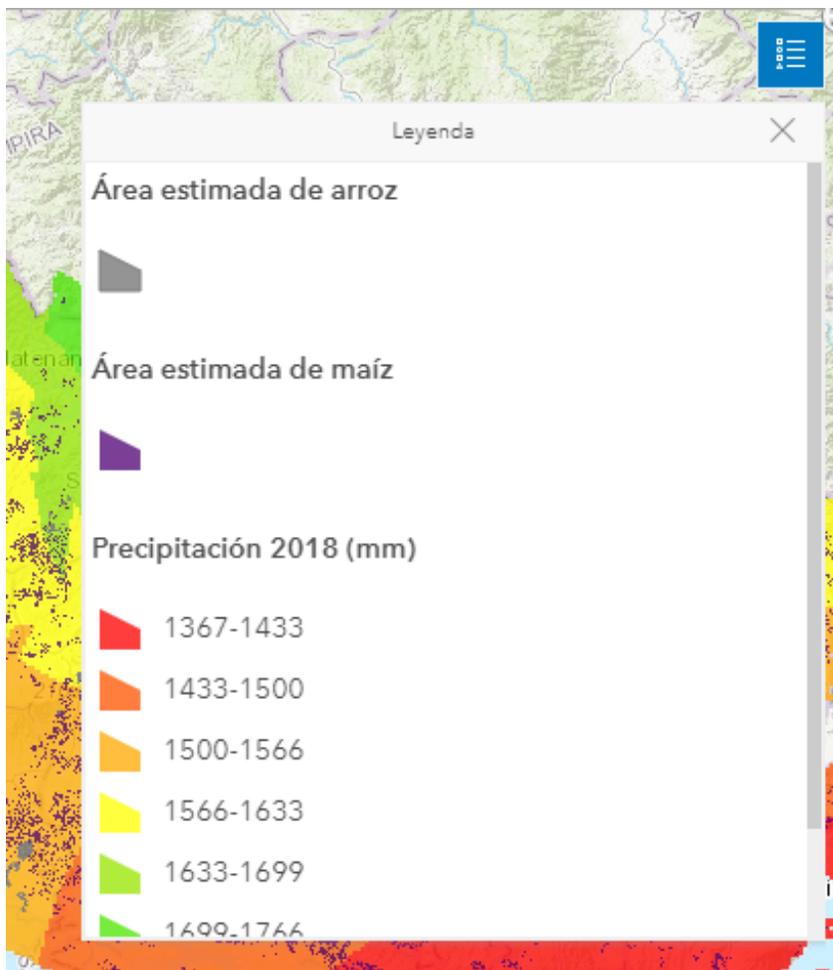


Figura 46. Leyenda de mapa web

Sección de gráficos de barra (2)

Está conformada por tres gráficos consolidados para todo el periodo de estudio para poder cambiar de tipo gráfico, haga clic en la pestaña que contiene el nombre del gráfico a visualizar de la barra inferior y este quedará con una línea resaltada en color azul lo cual indica que está activo.



Figura 47. Pestañas de selección de gráfico.

El primer gráfico corresponde a los datos de precipitación; representando los datos de lluvia mínimos para cada año en barras color rojo y los máximos en barras color azul; para activarlo debe hacer clic en la pestaña “Precipitación” de la barra inferior de esta sección y para visualizar el dato de precipitación en particular para cada año ya sea máximo o mínimo debe posicionar el puntero del mouse sobre la barra correspondiente, se mostrará como la pantalla siguiente:

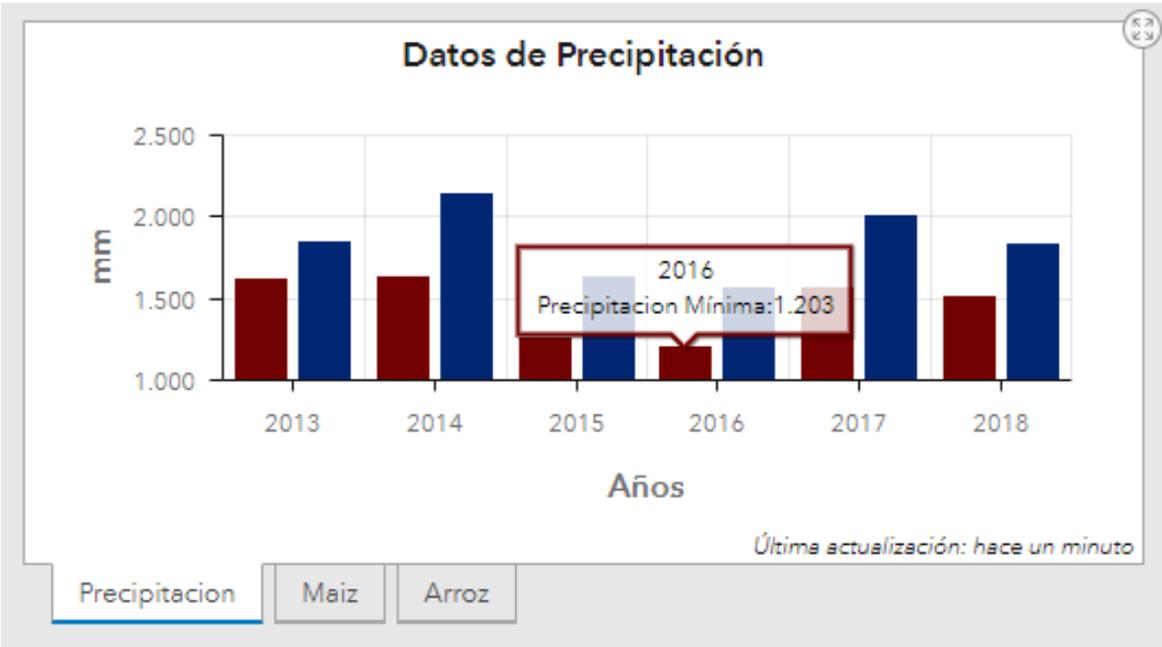


Figura 48. Gráfico de precipitación.

El segundo gráfico es el de superficie de maíz, muestra el valor estimado en una barra en color amarillo para cada año; para activar la vista del gráfico debe hacer clic sobre la pestaña “Maíz” de la barra inferior de esta sección y para desplegar la cantidad de hectáreas estimadas para cada año posicione el puntero del mouse sobre cada barra.

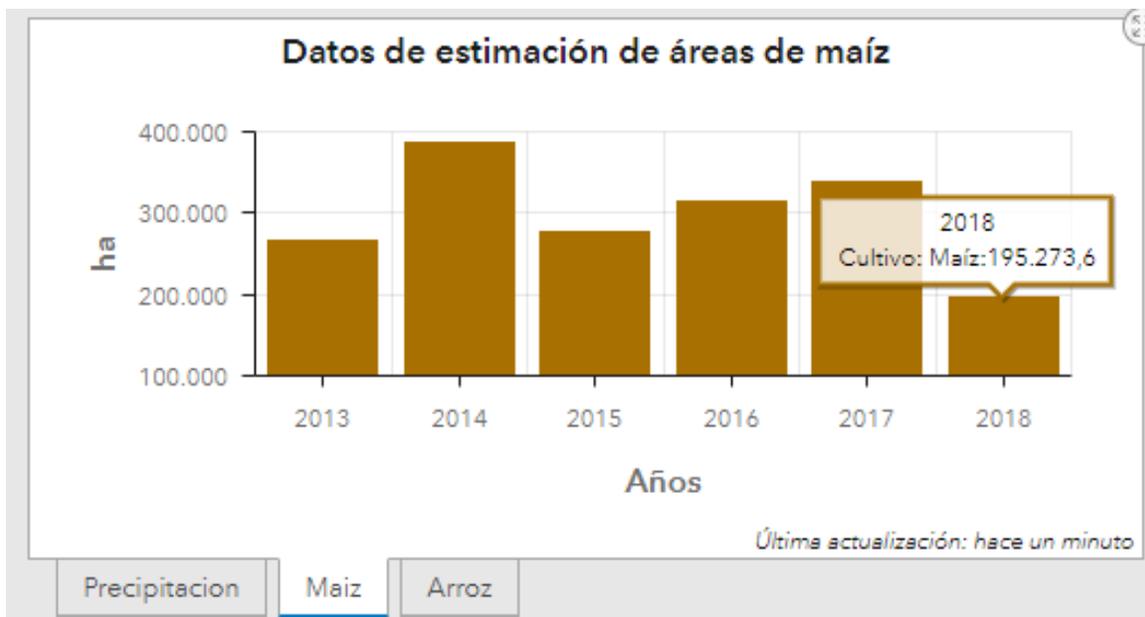


Figura 49. Gráfico de estimación de áreas de maíz.

El último gráfico de esta sección es el de superficie de arroz, muestra el valor estimado de superficie de arroz en color verde; al igual que los dos gráficos anteriores para activarlo debe hacer clic sobre la pestaña “Arroz” de la barra inferior de esta sección y para mostrar la cantidad de hectáreas para cada año posicione el puntero del mouse sobre cada barra.

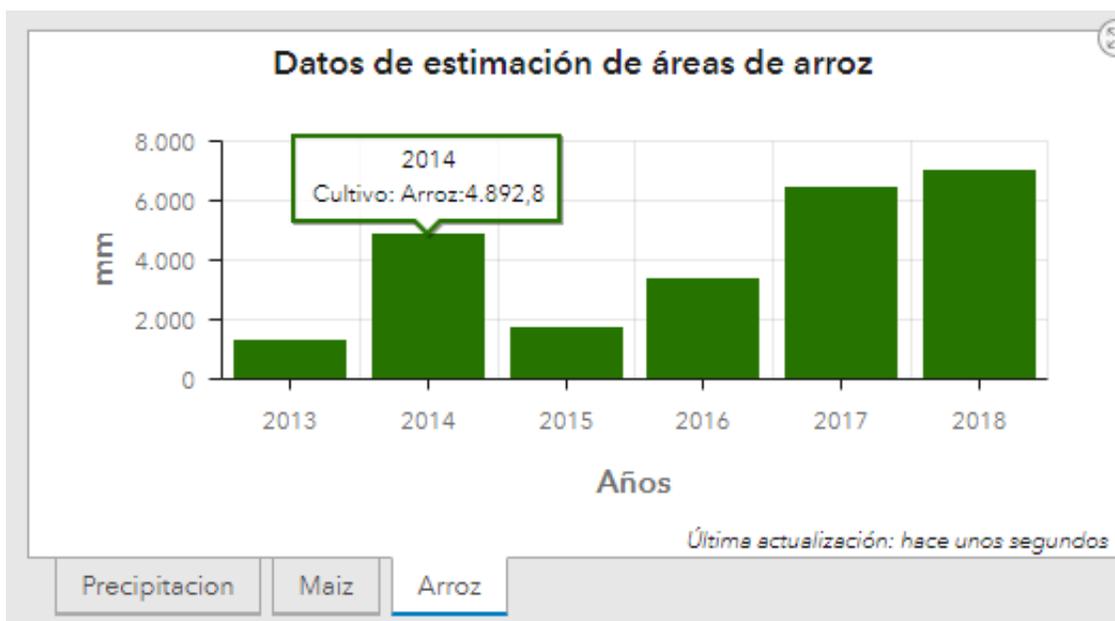


Figura 50. Gráfico de superficie estimada de arroz.

Sección de gráficos circulares (3)

Esta parte está comprendida por dos gráficos que muestran la distribución porcentual de superficie para cada zona geográfica y para cada año comprendido en el periodo de estudio; el color azul representa la zona occidental; el color amarillo la zona central, el color rojo la zona norte y el color verde representa la zona oriental; para cambiar la vista de datos correspondiente a cada año, haga clic en la flecha de desplazamiento ya sea izquierda o derecha y automáticamente cambiará el gráfico y aparecerá el año que haya activado al centro en el recuadro.



Figura 51. Barra de desplazamiento de gráficos por cada año.

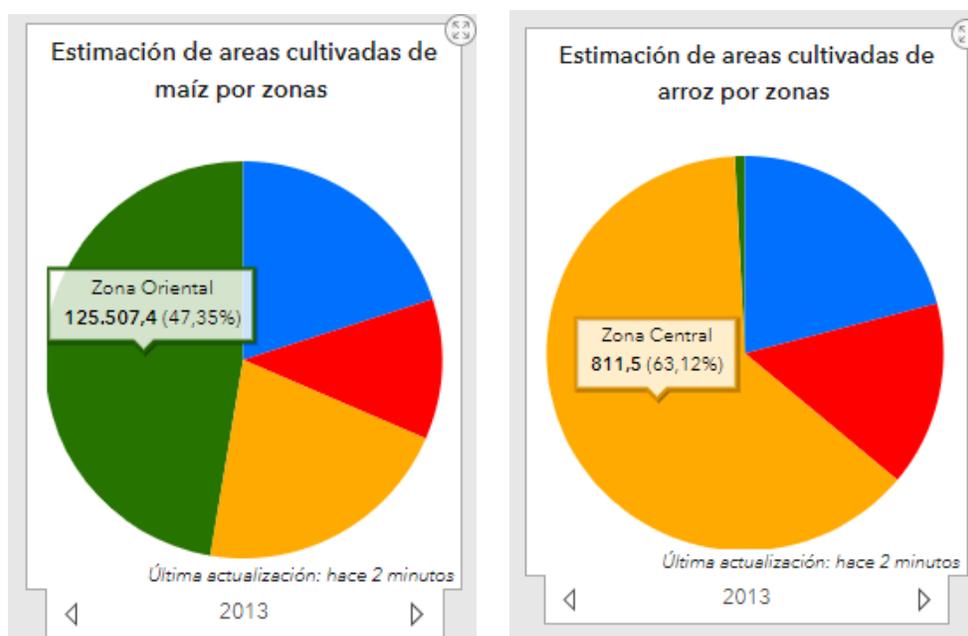


Figura 52. Gráficos de distribuciones de estimación de superficies.

5. Discusión

Para hacer un análisis de los resultados de este estudio es importante remarcar lo que mencionan tanto la FAO (2010) como Leff et al (2004) citados por García-Mora y Mas (2011, p.84), respecto a que: “la cobertura global del suelo ha sido modificada para proveer de alimento y abrigo a más de seis mil millones de personas en décadas recientes, esta modificación se refiere a la expansión de áreas dedicadas a actividades agropecuarias”; y si se considera además que a nivel local según la FAO (2012, p. 10) “...en El Salvador el porcentaje de población rural es de 38% y del total de las familias rurales, el porcentaje de familias productoras de granos básicos es de 54%”; por tanto se volvió relevante hacer una estimación geoespacial de los efectos por variación de pluviosidad en la producción de granos básicos; estudio que arrojó como resultado global una estimación promedio de superficie de maíz en la zona central de 64,405.36 hectáreas por año.

Metodología de clasificación

La estimación de áreas de cultivo, fue producto de la aplicación de la metodología de clasificación supervisada de imágenes de satélite, la cual se basa en la firmas espectrales de las diferentes superficies y tal como lo plantean Flores-López y Scott (2000, p.33) en su trabajo realizado en Guanajuato, México; un estudio con este enfoque debe estar, “basado en el conocimiento previo de la zona de estudio donde se definen sitios de entrenamiento”; por tal razón para esta investigación esas regiones de entrenamiento se definieron a partir de polígonos que representaron las parcelas cultivadas de maíz y arroz como muestras identificadas en la zona central; luego con estos sitios de entrenamiento se hicieron clasificaciones del resto de píxeles de las imágenes satelitales, basadas en la función probabilística de máxima verosimilitud; sin embargo Flores-López y Scott (2000, p. 33), mencionan que con este método de clasificación se corre el riesgo al no seleccionar adecuadamente los sitios de entrenamiento o de excluir categorías de clasificación los resultados puedan presentar una sobreestimación de superficie.

Los resultados emanaron de una clasificación compuesta de tres escenas, en la cual cada escena correspondió a un mes; por lo general se tomaron imágenes para los meses de julio, agosto y octubre; ya que en este periodo tanto el maíz y el arroz se encontraban en su etapa de desarrollo, es decir, presentaban mayor vigorosidad en su follaje; lo cual permitió realizar una mejor delimitación; estos resultados fueron similares a los obtenidos por Nolasco, Willington y Bocco (2015); a pesar de haber utilizado como fuente principal de información una imagen satelital de diferente tipo e incluso otro software de SIG para procesar la información; lo cual da validez o respaldo que se hizo una adecuada aplicación de dicha la metodología.

Discriminación de superficies de cultivos

Otro factor importante a considerar en este estudio fue la discriminación de los cultivos para ello se eligieron once macro clases de diferentes superficies como: maíz, arroz, pastizal, caña, café, bosques latifoliado, salado y de coníferas; así como zonas urbanas, agua y suelo desnudo; a fin de obtener una mejor delimitación de áreas de los cultivos de maíz y arroz; similar cantidad y tipos de categorías utilizaron Ortiz y Pérez (2009, p. 4929), en su estudio realizado en Colombia sobre discriminación de áreas de uso agrícola a partir de imágenes ASTER; lo cual indica que lo más importante para estudios de estimación de superficies es definir la mayor cantidad de macro clases o categorías de clasificación posibles, a través de un muestreo de parcelas con la mayor precisión lo cual posible realizar en este estudio mediante el uso de dispositivos como GPS o dron.

Firmas espectrales

Esta investigación se centró específicamente en el cálculo y análisis de las firmas espectrales de maíz y arroz; en ese sentido los rangos de valores reflejados en cada signatura espectral calculada, demuestran que ambas firmas, presentaron un comportamiento típico de toda firma de vegetación, similar al descrito por Lobo (1995), citado por Alonso, Moreno y Rodríguez (1999, p. 431); así como por Ortiz y Pérez (2009, p. 4930); éstas se caracterizaron por tener baja reflectividad en la banda roja del espectro visible, lo cual se debe a la absorción de la radiación por la clorofila en la fotosíntesis; además presentan un valor elevado en la región verde, y una alta reflectividad en la región de la banda infrarrojo cercano; valor que por lo general, es mucho mayor que el de las tres bandas del espectro visible; esto se debe a la baja fracción que absorbe la clorofila y la estructura de las hojas, lo cual es una característica de toda vegetación sana y que se distingue con color verde vigoroso o intenso; toda la teoría antes descrita se comprobó numéricamente según los rangos de valores obtenidos los cuales fueron los siguientes: para la firma espectral de maíz la banda del color rojo presentó los valores más bajos (7,232-7,462 micrómetros) y en la de infrarrojo cercano los valores más altos (23,299 - 23,630 micrómetros); también para la firma espectral de arroz se observó la misma tendencia en las mismas bandas; ya que lo menores valores se obtuvieron en la banda del rojo visible y fueron: 6,672 - 6,948 micrómetros y los mayores en la banda infrarrojo cercano: 21,288.10 – 23,394.13 micrómetros; importante resaltar que la magnitud de los valores fue mayor para ambos en el cultivo de maíz, lo cual podría deberse al mayor tamaño tanto de la planta como de la hoja.

Ese comportamiento similar de ambas firmas espectrales antes descrito, también generó dos limitaciones al momento del procesamiento de datos: la primera se dio por la similitud que presentó la firma de arroz y la de pastizales, muchos de los cuales por ser de origen natural se encuentran presentes todo el año en la superficie; ambas firmas tienden a confundirse lo cual se reflejaba gráficamente en

una superficie de arroz sobreestimada; esta situación se resolvió incluyendo en el procesamiento, datos de pendientes calculados y se tomó como parámetro delimitador máximo seis grados de pendiente; este valor de referencia fue tomado de la recomendación hecha por la FAO (s.f., párr. 10) la cual dice: “evitar cultivar arroz en laderas demasiado inclinadas, y sugiere como pendientes menores a diez por ciento o su equivalente a seis grados”; el otro caso también se dio por la similitud de firma entre los cultivos del maíz y sorgo; para solventar esta situación se hizo una mejor delimitación de los polígonos de entrenamiento de maíz seleccionando parcelas con un área de 30 metros cuadrados, que es el área mínima que puede ser detectada en una imagen Landsat 8, y se agregaron los datos de delimitación con GPS tomados in situ; se recomienda para el desarrollo de futuras investigaciones acceder a otras imágenes de mayor resolución espectral y/o espacial.

Precipitación y método de interpolación

La influencia que pudiera tener la cantidad de lluvia acumulada en un año respecto a la estimación geoespacial de superficies de cultivo de arroz y de maíz; fue lo que dio un valor agregado a dicha estimación de área de cultivo; y considerando además que en El Salvador en los últimos años se ha experimentado la incidencia de fenómenos como El Niño, donde la baja magnitud de precipitación o la cantidad de días consecutivos sin lluvia ha afectado a las actividades agrícolas y ha traído incluso consecuencias más graves para las comunidades rurales que en su mayoría basan su economía en este tipo de actividades; lo cual incide en la disminución del aporte de alimentos para la población o el encarecimiento de los granos básicos; por ello el periodo de estudio quedó definido entre los años 2013 al 2018; ya que de acuerdo a informes de sequía meteorológica publicados por el MARN ha habido una fluctuación entre años con sequía y años con época lluviosa normal, predominando los años con ocurrencia de este fenómeno meteorológico; en los años 2015 y 2016, en el país hubo incluso sequía severa sobre todo en oriente y moderada en el resto del país, (MARN, 2017); pero en el año 2017 según los datos de precipitación anual acumulada fue el segundo año con mayor precipitación a nivel nacional; la situación vuelve a cambiar el año 2018, ya que según monitoreo del MARN, hubo sequía débil en los meses de junio, moderada en julio; e incluso severa en el mes de agosto en una pequeña extensión del territorio de la zona central (MARN, s.f.).

Todo lo anterior sirvió como base para analizar la cuantificación de hectáreas de zona agrícola en tres momentos respecto al fenómeno de sequía meteorológica: antes, durante y después de ocurrido; así también se conocieron las áreas geográficas con mayor afectación o impacto tomando como dato principal la cantidad de hectáreas que redujo cada área de cultivo.

El método de interpolación que mejor se ajustó para procesar datos de precipitación anual acumulada y generar la respectiva cartografía fue el método de kriging, el cual según la FAO (2003), citado por Puerta, Rengifo y Bravo (2013, p. 29) es un método geo estadístico que describe una correlación temporal – espacial entre valores de atributos, para el caso se tuvieron la ubicación y altitud de las estaciones y el valor mensual de precipitación de cada una; además este método tiene amplia aplicabilidad en diferentes áreas entre ellas la meteorología la cual engloba la variable precipitación; así también Fallas y Valverde (2009, p. 5), en su estudio sobre mapas de precipitación en Costa Rica afirman que: “este método representa mejor la influencia de las condiciones regionales en la estimación puntual de la precipitación”, lo cual también concordó con las condiciones de la zona de estudio abordada en esta investigación, ya que para obtener mapas de precipitación se tomaron como insumos los datos de registrados en una red de 23 estaciones ubicadas diferente altura sobre el nivel del mar y distribuidas en todo el país.

Análisis de resultados a nivel país.

Con respecto a la estimación de superficie, los resultados generales indican que en todos los años del periodo en estudio y en todas las zonas geográficas, la superficie estimada de maíz fue muy superior a la de arroz, una causal de esto podría ser que buena parte del territorio de El Salvador presenta un relieve montañoso, conformando incluso cordilleras; lo cual no es el escenario adecuado para el cultivo de este grano, cuyas condiciones óptimas de terreno para su siembra son llanuras y estas a su vez deben estar cerca de alguna fuente de agua como ríos o canales de riego; otro factor que puede haber influido en este resultado es que de acuerdo a los datos presentados por el sitio Central America Data, (2018) en los últimos años todos los países del istmo centroamericano están optando por importar ese grano básico de otros países en lugar de cosecharlo, debido al alto costo de producción; reportando para El Salvador una inversión de 40 millones en importación de arroz en el año 2018.

Como resultado general sobre precipitación, se obtuvo lo siguiente: Los años con mayor precipitación acumulada fueron 2014 y 2017, donde se alcanzaron hasta 2,135 mm y 2,008 mm respectivamente; por el contrario, los valores mínimos se registraron en los años 2015 y 2016 con 1,253 mm y 1,203 mm respectivamente; años que presentaron una disminución notable en la estimación de área agrícola tanto para maíz como arroz hubo a nivel nacional.

Respecto a la superficie estimada de maíz, la mayor extensión se registró en 2014, con 386,763.88 hectáreas coincidiendo con el año que presentó la mayor cantidad de lluvia acumulada 2135 mm; de la extensión total, el 47% se localizó en la Zona Oriental (181,756.98 has.), el 22% en la Zona Occidental (84,809.20 has.), el 21% en la Zona Central (79,918.47 has.) y el 10% en la Zona Norte (40,279.23 has.).

La mayor variación en cuanto a la estimación de superficie de maíz se dio en el año 2018, donde se obtuvieron 142,065.29 hectáreas menos que el año 2017, lo cual se podría atribuirse al hecho de que según el MARN, en sus informes hubo sequía débil en casi todo el país al inicio de la época lluviosa, sequía moderada en julio e incluso sequía severa sobre todo en oriente y parte de la zona central en el mes de agosto (MARN, s.f.); meses importantes en los periodos de siembra; sin embargo, al analizar la fluctuación de la superficie estimada de maíz, de manera global para todo el periodo de estudio, ésta tendió a incrementar, el mayor incremento ocurrió en el año 2014 con 121,690.98 hectáreas más respecto a 2013.

La estimación de áreas de cultivo de arroz presentó el siguiente comportamiento a nivel nacional: la mayor estimación de área se dio en el año 2018 con 6,996.89 hectáreas distribuidas de la siguiente manera: Zona Occidental con 2,313.47 has. (33%), Zona Central con 2,312.31 has. (33%), Zona Norte con 2,130.28 has. (31%) y Zona Oriental con 240.84 has. (3%).

La variación en cuanto a la estimación de áreas de arroz presentó una tendencia similar a la estimación de áreas de maíz, ya que en el año 2015 fue el año en el que hubo un decremento de 3,178.13 has.; en los años siguientes, hubo incrementos con un valor máximo de 3,068.94 has. en 2017, el segundo año del periodo con mayor cantidad de precipitación acumulada anual.

Análisis de resultados de la zona Central.

En esta zona que incluyó la mayor parte de territorio del país, los principales resultados fueron los siguientes: la precipitación obtuvo el menor valor en 2015 con 1,316 mm de lluvia acumulada; y 1,990 mm en 2014, uno de los registros más bajos en todo el periodo; la reducción de superficie se dio en mayor magnitud en el año 2018 con 45,860.23 has. de maíz y en 2013 con 811.49 has. de arroz; y la mayor expansión se reflejó en el año 2017 para ambos cultivos con 79,918.47 has. de maíz y 2,740.72 has. de arroz; importante mencionar que la estimación para los dos cultivos presentó una tendencia a decremento de superficie para la mayoría de años, pero poco significativos.

Todos los resultados para la zona central revelan que esta zona fue la segunda menos afectada por disminución de pluviosidad; sin embargo esto contrasta con las franjas territoriales con afectación de sequía en el corredor seco, (FAO, 2012, pp. 43 y 44), ya que según ese estudio hay un área ubicada en el departamento de San Vicente que presenta un grado de afectación de sequía severo, lo cual la convierte en zona proclive a un alto impacto en la reducción de zona agrícola por efectos de sequía al menos en esa porción de territorio en particular.

6. Conclusiones

- 1- El uso de procesos de teledetección como la clasificación supervisada de imágenes a través de determinación de firmas espectrales; desarrollados en softwares de sistemas de información geográfica, permitió hacer una estimación geoespacial de superficie de cultivos de maíz y arroz la zona central de El Salvador, así como una estimación temporal para cada año de estudio.
- 2- El procesamiento y análisis por escenas integradas de productos de sensores remotos, tratamiento que se aplicó a una serie temporal de imágenes Landsat 8 utilizada en este estudio, permitió hacer una delimitación de cobertura del suelo agrícola con una buena precisión; esto se reflejó en una mejor visualización gráfica en la cartografía correspondiente a través de la discriminación entre superficies de maíz y arroz.
- 3- De acuerdo a los resultados de la cartografía de precipitación, se comprobó numéricamente que en los años 2015 y 2016 hubo una disminución de entre 400 y 600 mm respecto al resto del periodo en estudio; ya que en estos dos años los valores máximos de lluvia fueron similares a los valores mínimos de los otros años del periodo; e incluso en el año 2018 se prolongó esta disminución de precipitación pero menor grado; todo esto confirma la ocurrencia frecuente de sequía meteorológica en El Salvador; cabe mencionar para todos estos años con menor cantidad de lluvia, hubo menor estimación de superficie cultivada más marcada en arroz que en maíz.
- 4- Según los resultados de áreas estimadas; la cantidad de área para maíz fue muy superior a la de arroz en todos los años; esto podría atribuirse entre otras cosas a que el cultivo de arroz requiere terreno apropiado en cuanto a pendientes bajas o nula, tiene mayor requerimiento hídrico que el maíz y además al incremento de la importación de este grano en todos los países del istmo centroamericano en los últimos años.
- 5- Al contrastar gráficamente los datos de cantidad de lluvia acumulada anual y la superficie estimada de maíz y de arroz a nivel nacional en conjunto; se evidenció que la disminución en la pluviosidad acompañó a la reducción en la extensión cultivada y que un aumento de la precipitación conduce al incremento del área cultivada pero en menor proporción; este escenario tuvo diferencias notables al hacer el análisis de resultado por zona geográfica, el cual reflejó que hay mayor impacto de sequía en la superficie estimada de cultivo de arroz.

- 6- De acuerdo a los resultados de la variación del área cultivo (maíz y arroz) respecto a la variación promedio de precipitación anual acumulada de la zona central de El Salvador; ésta zona se identificó con menor grado de afectación a eventos de sequía meteorológica y a la reducción de área de cultivo por efectos de reducción de precipitación anual acumulada respecto a otras zonas del país.

- 7- El uso de la plataforma ArcGIS Online, permitió el desarrollo de una aplicación que integra los mapas elaborados en un ambiente interactivo y ordenado; que permite una visualización de los datos en forma dinámica y agradable para el usuario; convirtiéndose en una herramienta fácil de utilizar para hacer consulta sobre datos de superficie cultivada, tanto a nivel nacional como por zona geográfica, y por año.

7. Referencias

- Agisoft. (2009). *Agisoft*. Recuperado de <https://www.agisoft.com/>
- Alonso, C., Moreno, V., y Rodríguez, E. (1999). *Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección*. Recuperado de <http://www.aet.org.es/congresos/viii/alb99.pdf>
- Bravo Morales, N. F. (2017). *Teoría- Teledetección espacial Landsat, Sentinel-2, ASTER L1T, MODIS. Huánuco, Perú*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/368126307/Libro-Teledeteccion-Espacial-2017>
- Campillo Torres, C., Prieto Losada, H., Millan Árias, S., y Fortes Gallego, R. (2016). *Propuestas tecnológicas para una gestión eficiente en agricultura de regadío*. Recuperado de <https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/eia/archivos/iag/2016/2016-08-propuestas-tecnologicas-para-una-gestion.pdf>
- Central America Data. (2019). *Arroz: Compras crecieron 34% en 2018*. Recuperado de https://www.centralamericadata.com/es/article/home/Arroz_Compras_creccion_34_en_2018
- Central America Data. (2019). *Cada vez más arroz importado en Centroamérica*. Recuperado de https://www.centralamericadata.com/es/article/home/REV_AC_Importacion_de_arroz_crece_56
- Centro de Recursos Digitales. Educar Chile. (s.f.). *Espectro electromagnético*. Recuperado de <http://centroderecursos.educarchile.cl/bitstream/handle/20.500.12246/40847/Diagrama18.jpg?sequence=1&isAllowed=y>
- Chartuni Mantovani, E., y Magdalena, C. (2012). *Manual de agricultura de precisión*. Recuperado de <https://www.tysmagazine.com/libro-gratuito-manual-de-agricultura-de-precision/>
- Descubre QGIS. (s.f.). *QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio*. Recuperado de <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente. (s.f.). *Percepción remota*. Recuperado de <https://www.diccionariomedioambiente.org/DiccionarioMedioAmbiente/es/verInformacion.aspx?id=1117>

- Drone Deploy. (s.f.). *Drone Deploy*. Recuperado de <https://www.dronedeploy.com/>
- EcuRed: Enciclopedia cubana. (s.f.). *Sensores activos, sensores pasivos*.
Recuperado de https://www.ecured.cu/images/b/bf/Sensores_remotos.jpg
- El Salvador , Centro Nacional de Registros. (s.f.). *Geoportal CNR*. Recuperado de <https://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>
- El Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Cuatro años continuos de sequía en El Salvador: 2012 - 2015* . Recuperado de http://www.marn.gob.sv/descargas/docuemnto-sequia-meteorologica-edc2016-web-pdf/?wpdmdl=29861&ind=aHBWzaNSB-o1mqpMuNKNKWbixg3Xr_zP13zEbbjSFoHgrksaUMcXICU_yiZKTjoPuaBxZuA5mXI5i1m87K5kGg
- El Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Informe Sequía 2016*. Recuperado de <http://www.marn.gob.sv/informe-sequia-2016/>
- El Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Monitoreo Sequía 2015*. Recuperado de http://www.marn.gob.sv/monitoreo-sequia-2015/?cp_informe_sequia_2015=1
- El Salvador, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Monitoreo por sequia*. Recuperado de <http://www.marn.gob.sv/category/especiales/sequia/>
- Environmental Systems Research Institute. (2016). *Qué es ArcMap*. Recuperado de http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm#ESRI_SECTION1_C88FACCF707D43C99C5CB661A2017558
- Fallas, J., y Valverde, C. (2009). *Costa Rica: mapas de precipitación media anualestacional, meses secos y temperatura media anual*. Recuperado de <https://docplayer.es/13515625-Costa-rica-mapas-de-precipitacion-media-anualestacional-meses-secos-y-temperatura-media-anual.html>
- Flores-López, F. J., y Scott, C. A. (2000). *Superficie agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México*. Recuperado de http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Latin_American_Series/pdf/15_1.pdf
- García-Mora, T. J., y Mas, J. F. (2011). *Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México*. Recuperado de [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6301/\(7\)Garcia.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6301/(7)Garcia.pdf)

- Labrador García, M., Évora Brondo, J. A., y Arbelo Pérez, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio
- Marini, M. F. (2015). *Determinación de la superficie bajo riesgo con pivot central en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) utilizando imágenes satelitales*. Recuperado de <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/41/40>
- Nolasco, M., Willington, E., y Bocco, M. (2015). *Uso del suelo agrícola: comparación entre series temporales e imágenes satelitales individuales para su clasificación*. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/6968/901d96eef59fed48c14c4da07ecb2f35dbc8.pdf>
- Olaya, V. (s.f.). *Sistemas de Información Geográfica. Un libro libre de Víctor Olaya. Procesado de imágenes*. Recuperado de <https://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Imagenes.html>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2003). *Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/y2778s/y2778s00.htm#Contents>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). *Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano. Tomo I*. Recuperado de https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf
- Ormeño Villajos, S. (2006). *Teledetección fundamental, 3a Ed.* Recuperado de <http://pdi.topografia.upm.es/santi/descarga/FunTeled.PDF>
- Ortiz Lozano, N. E., y Pérez Gómez, U. (2009). *Imágenes ASTER en la discriminación de áreas de uso agrícola en Colombia*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/230851690_Imagenes_ASTER_en_la_discriminacion_de_areas_de_uso_agricola_en_Colombia
- Paruelo, J., Baldi, G., Guerschman, J. P., y Di Bella, C. M. (2004). *La estimación de la superficie agrícola. Antecedentes y una propuesta metodológica*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/242628345_La_estimacion_de_la_superficie_agricola_Antecedentes_y_una_propuesta_metodologica

- Puerta Tuesta, R., Rengifo Trigozo, J., y Bravo Morales, N. F. (s.f.). *Manual de Arcgis 10 Nivel Intermedio*. Recuperado de <http://arcgeek.com/descargas/MAG10I.pdf>
- Quispe Capquique, A. P. (2014). *Evaluación multitemporal del cambio de la cobertura vegetal mediante el uso de técnicas de teledetección y S.I.G. en la Colonia Siempre unidos del Municipio de Caranavi, La Paz, Bolivia*. Recuperado de <http://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/5609/T-2033.pdf?sequence=3>
- Rivas Domínguez, M. R., Martínez Ventura, M. J., Escuintla Morán, J. J., Monterroza Alemán, J. N., y Cano, S. A. (2019). *Estimación geoespacial de efectos por variación de precipitación en la producción de granos básicos. El Salvador 2013-2017*. San Salvador, El Salvador: Universidad Dr. Andrés Bello.
- Román Calvimontes, C. E. (2013). *Manual práctico de introducción al uso de ArcGIS versión 10.0*. Recuperado de <https://dlscrib.com/downloadFile/59bfd0b708bbc5e123686f3c>
- U.S. Geological Survey. (s.f.). *U.S.G.S. Science for a changing world. EarthExplorer - Home*. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Universidad de Jaén. (2007). *Técnicas geográficas estudio medio natural. Mapa de pendientes*. Recuperado de <http://tecnicasgfcas07ujaen.blogspot.com/2007/05/mapa-de-pendientes.html>
- von Martini, A., Bragachini, M., Bianchini, A., Martellotto, E., y Méndez, A. (s.f.). *Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi*. Recuperado de <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/percepcion-remota/Percepcion-Remota.asp>



“La teledetección es el arte-ciencia que provee la teoría y los instrumentos que nos permiten entender la forma en que los objetos y los fenómenos son detectados, registrados, almacenados y procesados por un sistema sensor”.

(Reuter, 2009)



Comisión de Acreditación de la
Calidad de la Educación Superior
UNIVERSIDAD DR. ANDRÉS BELLO (UNAB)
ACREDITADA
2019 - 2024

UNIVERSIDAD DR. ANDRÉS BELLO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y
PROYECCIÓN SOCIAL
ÁREA: TECNOLOGÍA