



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL BIOENERGÉTICO EN
ANGAMACUTIRO, MICHOACÁN, A PARTIR DE
RESIDUOS AGRÍCOLAS**

TESIS

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA:

ANA ISABEL CASTRO REYES

COMITÉ TUTOR

DR. ADRIÁN GHILARDI

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM

DR. MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM

DR. PEDRO CORONA ROMERO

SCiESMEX, Instituto de Geofísica, Unidad Morelia

JURADO EXAMINADOR

DR. OMAR RAUL MASERA CERUTTI

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM

DRA. ALEJANDRA CASTRO GOZÁLEZ

Facultad de Ingeniería, UNAM

DR. MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM

DR. ADRIÁN GHILARDI

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM

DRA. YAN GAO

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DECLARACIÓN DE ÉTICA ACADÉMICA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la asignación de la beca. De igual manera, agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER CONACYT 2014 246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica por proporcionar el equipo de cómputo que facilitó la realización de este trabajo.

La elaboración de esta tesis requirió bastante dedicación de mi parte, pero gracias a la cooperación y apoyo de varias personas el proceso fue enriquecedor, más ameno y más sencillo. Por ello, es para mí un gusto utilizar este espacio para expresar mis agradecimientos.

A mis padres, Julio y Romelia, porque su presencia, su apoyo y su consejo son soportes para mi vida. En especial quiero agradecer a mi papá porque fue mi compañero durante el trabajo de campo, por caminar a mi lado y compartirme su experiencia. A mis hermanos, Julio y Daniel, con quienes siempre he contado; y a mi hermana Sofi, por su paciencia para escucharme, por leer y revisar algunos aspectos de la redacción de la tesis y por las horas de risa que siempre compartimos.

A mi pareja, José Juan, por su paciencia, su tiempo para escucharme y además plantearme alternativas o sugerencias para resolver las problemáticas que se presentaron en la maestría.

A mis amigos, por escucharme y porque de una u otra forma siempre están presentes y pendientes de mi bienestar. También agradezco a mis compañeras de generación, Vania y Marlene, por contar con su apoyo siempre.

Al Maestro Guillermo agradezco sus sugerencias que fueron vitales para el planteamiento del problema; también a Alexander Quevedo quien siempre tuvo la mejor actitud y el tiempo para aclarar mis dudas; a los Dres. Adrián

Ghilardi, Pedro Corona y Eduardo Mendoza, quienes estuvieron pendientes de mi desempeño en la maestría y de la elaboración de la tesis, gracias por su valiosa aportación, sus comentarios y sugerencias. También agradezco al Dr. Omar Maserá y a las Dras. Yan Gao y Alejandra González por su buena disposición para revisar esta tesis, haciendo observaciones y correcciones de manera oportuna.

Por último, agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra por permitirme vivir esta experiencia y conocer a algunos docentes que aman y comparten su trabajo de tal forma que no sólo enseñan conceptos, sino que además enseñan a ver el mundo de otra manera.

Índice general

Agradecimientos	I
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VI
Abstract	VII
Resumen	VIII
1. Planteamiento del problema	3
1.1. Objetivo general	4
1.1.1. Objetivos particulares	4
1.2. Supuestos de trabajo	5
2. Antecedentes	6
2.1. Biomasa	6
2.1.1. Residuos agrícolas	8
2.2. Bioenergía a partir de residuos agrícolas	9
2.2.1. Combustión directa	13
2.2.2. Gasificación	14
2.2.3. Características de los sistemas de conversión	15
2.3. Técnicas de teledetección para la estimación de biomasa	16
3. Área de estudio	20
3.1. Aspectos sociales	21
3.2. Cubierta vegetal y uso de suelo	22
3.3. Hidrografía	22
3.4. Clima	22

4. Metodología	23
4.1. Trabajo de campo	23
4.2. Mapa de distribución de los cultivos	26
4.2.1. Insumos	26
4.2.2. Clasificación Supervisada	33
4.2.3. Evaluación de los resultados de la clasificación	34
4.3. Oferta espacial y temporal de residuos agrícolas	42
4.4. Conversión de residuos a energía eléctrica	44
5. Resultados y discusión	45
5.1. Encuesta	45
5.2. Clasificación supervisada: Random Forest	48
5.2.1. Clasificación Random Forest primavera-verano	48
5.2.2. Evaluación de la clasificación primavera-verano	49
5.2.3. Clasificación Random Forest otoño-invierno	51
5.2.4. Evaluación de la clasificación otoño-invierno	52
5.3. Oferta espacial y temporal de residuos agrícolas	54
5.3.1. Rendimiento de los cultivos	54
5.3.2. Residuos disponibles	58
5.4. Energía eléctrica	60
5.4.1. Combustión	60
5.4.2. Gasificación	62
6. Conclusiones	64
6.1. Trabajo a futuro	65
A. Encuesta	66

Índice de figuras

3.1. Ubicación del municipio de Angamacutiro, Michoacán. Imagen Sentinel 2A, octubre 2017.	21
4.1. Distribución de los puntos primavera-verano tomados en campo.	24
4.2. Distribución de los puntos otoño-invierno tomados en campo. .	25
4.3. Imágenes Sentinel 2A	26
4.4. Distribución de los polígonos de entrenamiento y verificación primavera-verano.	28
4.5. Distribución de los polígonos de entrenamiento y verificación otoño-invierno.	30
4.6. Digitalización de la cobertura y uso del suelo.	31
4.7. Capa de agricultura sin ríos, caminos ni canales.	32
4.8. Capas ráster de la zona agrícola.	33
4.9. Ejemplo de la matriz de confusión.	35
4.10. representación matemática de la matriz de confusión.	36
4.11. Proporciones marginales del mapa.	39
4.12. Matriz de error de las probabilidades individuales de cada celda.	40
5.1. Clasificación supervisada de la superficie agrícola primavera-verano.	49
5.2. Clasificación supervisada de la superficie agrícola otoño-invierno.	52
5.3. Perímetros ejidales dentro del límite municipal de Angamacutiro.	55
5.4. Distribución del toneladas generadas en primavera-verano . . .	57
5.5. Distribución del toneladas generadas en otoño-invierno	58

Índice de tablas

2.1. Factores de residuos.	9
2.2. Poder calorífico.	10
2.3. Porcentaje de humedad.	10
4.1. Clases de los polígonos de entrenamiento y verificación primavera-verano.	27
4.2. Clases de los polígonos de entrenamiento y verificación otoño-invierno.	29
5.1. Resultados de la encuesta sobre cultivo de maíz.	46
5.2. Resultados de la encuesta sobre cultivo de sorgo.	47
5.3. Resultados de la encuesta sobre cultivo de trigo.	48
5.4. Matriz de confusión: clasificación primavera-verano.	50
5.5. Proporciones marginales de las clases de primavera-verano.	50
5.6. Intervalos de confianza para las clases de primavera-verano.	51
5.7. Matriz de confusión: clasificación otoño-invierno.	53
5.8. Proporciones marginales de las clases de otoño-invierno.	53
5.9. Intervalos de confianza para las clases de otoño-invierno.	54
5.10. Ejidos dentro del límite municipal.	56
5.11. Rendimiento promedio de los cultivos: maíz, sorgo y trigo.	56
5.12. Residuos de maíz disponibles.	59
5.13. Residuos de sorgo disponibles.	59
5.14. Residuos de trigo disponibles.	59
5.15. Energía eléctrica a partir de residuos de maíz.	60
5.16. Energía eléctrica a partir de residuos de sorgo.	61
5.17. Energía eléctrica a partir de residuos de trigo.	61
5.18. Energía eléctrica final mediante combustión.	62
5.19. Energía eléctrica a partir de los residuos de los tres cultivos.	63
5.20. Energía eléctrica final mediante gasificación.	63

Abstract

The main objective of this thesis was to estimate the amount of electricity that can be obtained from the combustion or gasification of crop residues, in the municipality of Angamacutiro, Michoacán. The analysis included maize and sorghum residues in the spring-summer 2017 cycle and wheat residues in the autumn-winter 2017-2018 cycle. Biopower potentials were obtained by integrating: 1) remote sensing techniques to quantify the spatial distribution of resources, 2) unitary productivity estimates from census datasets and field surveys, and 3) plausible biomass-to-energy technological options. Six possible results were estimated: in the worst case, through combustion, it could be supplied a 1 MW system and up to 4,418 people per year; in the best scenario, through gasification, electricity could supply a system between 1 and 20 MW of power and to the entire population of Angamacutiro.

Keywords: *Crop residues, electricity, combustion, gasification, Random Forest.*

Resumen

El objetivo principal de esta tesis fue estimar la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener a partir de la combustión o gasificación de residuos agrícolas, en el municipio de Angamacutiro, Michoacán. El análisis incluyó a los residuos de maíz y sorgo en el ciclo primavera-verano 2017 y a los residuos de trigo, en el ciclo otoño-invierno 2017-2018. La estimación de la energía eléctrica se obtuvo integrando: 1) teledetección para obtener la distribución espacial de los recursos con una clasificación supervisada, aplicando el método Random-Forest sobre la zona agrícola del municipio, 2) el rendimiento de los cultivos a partir de información de censos y encuestas de campo y 3) opciones viables de las diferentes tecnologías para la conversión de biomasa a energía eléctrica. Se estimaron seis posibles resultados: en el peor de los casos, mediante combustión, se podría dar abasto a un sistema de 1 MW y hasta a 4,418 personas al año y en el mejor escenario, a través de gasificación, se podría suministrar energía eléctrica a un sistema entre 1 y 20 MW de potencia y a la población de Angamacutiro.

Palabras clave: *Residuos agrícolas, energía eléctrica, combustión, gasificación, Random-Forest.*

Introducción

La generación de energía renovable es una alternativa al sistema de producción actual, que en su mayor parte, genera energía mediante la quema de combustibles fósiles. Las reservas de estos combustibles son abundantes pero finitas, y dependiendo del tipo de combustible fósil y del método de quemado se producen diferentes tipos de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Además, el petróleo y el gas natural presentan riesgos a la seguridad energética debido a que México registró su pico petrolero en 2004 (Johnson *et al.*, 2010). Hay que considerar también la creciente demanda de energía, se estima que para el año 2030 México podría duplicar el consumo de la misma (Bauer, 2011). Para garantizar el suministro y acceso a la energía es necesario modificar el sistema energético actual por uno que haga un uso sustentable de los recursos naturales, que logre impactos ambientales positivos y que propicie el desarrollo socioeconómico.

En 2015 la Secretaría de Energía (SENER) registró una producción de 8,261.029 petajoules que fueron generados en su mayoría por combustibles fósiles (87.2 %), siguiendo las energías renovables con un 7.8 %, 3.5 % mediante carbón y 1.5 % en plantas nucleares (SENER, 2017). Dentro de las fuentes renovables para la producción de energía, la biomasa es una de las que tienen mayor potencial (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010; Ghilardi *et al.*, 2006). Entre los recursos de biomasa disponibles en México y que además no han sido explotados, están los residuos agrícolas que cuentan con un alto potencial técnico para la generación de electricidad (76 millones al año de acuerdo con Valdez-Vazquez *et al.* (2010) o 71 millones de toneladas al año según Ghilardi *et al.* (2006)).

A pesar del alto potencial que ha sido reportado, lograr que la generación de electricidad mediante residuos agrícolas sea un hecho en México, es una tarea complicada. Por un lado, como sugieren Alemán-Nava *et al.* (2014), es necesario que las políticas de energía renovable vayan de la mano con las regulaciones existentes de las fuentes de energía comunes y las condiciones

actuales de los mercados locales de energía. Y por otra parte, las relaciones entre oferta y demanda de recursos bioenergéticos son muy específicas del sitio, es decir, dependen de múltiples factores que no son extrapolables o generalizables para toda un área de estudio, y mucho menos para una región o país.

El análisis y modelado espacial, y la geografía en lo general, permiten abordar la heterogeneidad espacial del área de estudio para producir resultados específicos del contexto territorial con mayor aplicabilidad y significado para la toma de decisiones y la política pública (Pasqualetti & Brown, 2014).

En este trabajo se llevó a cabo un estudio sobre el potencial bioenergético para la generación de energía eléctrica mediante residuos agrícolas en el municipio de Angamacutiro, Michoacán, durante dos ciclos agrícolas, primavera-verano (2017) y otoño-invierno (2017-2018). La evaluación se hizo sobre los cultivos principales del municipio: maíz, sorgo y trigo.

En el primer capítulo se aborda el planteamiento del problema, ¿cómo se estimó el potencial bioenergético a partir de residuos agrícolas en Angamacutiro, Michoacán?

En el siguiente capítulo se hace una revisión de la parte teórica que sirvió como base para estimar el potencial bioenergético del municipio, así como de los trabajos existentes que han abordado el tema.

En el tercer capítulo se describe el área de estudio, la localización geográfica, aspectos sociales, cubierta vegetal y uso del suelo, etc.

En el capítulo cuatro se describe la metodología utilizada para la estimación de energía eléctrica a partir de los residuos agrícolas.

En el quinto capítulo se muestran los resultados obtenidos.

En el capítulo final se encuentran las conclusiones del trabajo, sugerencias y comentarios que podrán servir para trabajos futuros.

Capítulo 1

Planteamiento del problema

En Angamacutiro la agricultura es una de las principales actividades económicas; por un lado, se encuentra un sector tradicional correspondiente a conocimientos o prácticas ancestrales y empíricas, donde su producción suele ser de uso exclusivo para el agricultor y por otra parte, existe un sector moderno que incorpora ciencia y tecnología, que cuenta con sistema de riego, fertilizantes, control de plagas, etc., y que produce más a menor costo y en menor tiempo.

De acuerdo con la base de datos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON NG) los cultivos que destacan en el municipio son los de maíz, sorgo, calabaza y frijol en el ciclo de primavera-verano; y trigo, avena, garbanzo y fresa en el ciclo otoño-invierno. De estos, los que generan más restos de biomasa son los cultivos de maíz, sorgo y trigo. Después de la cosecha, es necesario deshacerse de dichos residuos para preparar el cultivo para el próximo ciclo de producción. Es sabido que una parte se empaca o se muele (designada principalmente para el ganado), otra se quema y el resto se barbecha. Cuando los residuos se queman representan un problema para las comunidades aledañas ya que el humo y la ceniza son liberados a nivel del suelo y, además, al realizarse en temporadas específicas del año, aumenta su concentración.

Es necesario contar con una alternativa de uso para los residuos y por eso se propone utilizarlos para generar energía eléctrica lo cual daría solución al problema de quema de cultivos y ayudaría a disminuir el uso de combustibles fósiles. La presente investigación pretende estimar la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener mediante la combustión y gasificación de residuos agrícolas.

Para estimar el potencial energético mediante residuos agrícolas del municipio, el problema se abordó en dos etapas:

1. En la primera etapa se evaluó la disponibilidad de residuos agrícolas. Se eligieron los cultivos de maíz, sorgo y trigo por ser las fuentes de residuos más prominentes en la región. La estimación se enfocó en dos ciclos productivos: primavera-verano 2017 y otoño-invierno 2017-2018. Para estimar la cantidad de residuos disponibles es necesario saber cuántas hectáreas fueron sembradas con cada una de las plantas de interés, por lo cual se propuso realizar una clasificación digital mediante el proceso conocido como *Random Forest* (Breiman, 2001) sobre dos imágenes satelitales Sentinel 2A correspondientes a cada ciclo productivo, de esta manera, se obtuvo además la distribución de la superficie sembrada con maíz, sorgo o trigo. La clasificación se llevó a cabo en los programas RStudio (RStudio Team, 2015), Arc map y QGis (QGIS Development Team, 2009). Posteriormente se estimaron los residuos generados en cada ciclo, tomando en cuenta el rendimiento promedio de dichos cultivos según los registros del SIACON NG en el periodo de 2007 a 2016.
2. Una vez que se estimó la cantidad de biomasa disponible se calculó la cantidad de energía eléctrica obtenida a través de dos procesos: combustión y gasificación. Para eso, se tomaron en cuenta el poder calorífico de los diferentes residuos y la eficiencia de las tecnologías de conversión disponibles.

1.1. Objetivo general

Estimar la cantidad de energía eléctrica que se produce a partir de la combustión y gasificación de residuos agrícolas.

1.1.1. Objetivos particulares

- Estimar las hectáreas que se siembran con cada tipo de cultivo en el ciclo de primavera-verano 2017 y otoño-invierno 2017-2018.
- Estimar la cantidad de residuos que se generan después de la cosecha.
- Estimar la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener mediante la combustión y gasificación de cada tipo de residuo.

1.2. Supuestos de trabajo

1. La actividad agrícola genera una importante cantidad de residuos.
2. Los residuos agrícolas pueden generar la suficiente energía eléctrica para beneficiar a la población de Angamacutiro.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Biomasa

La biomasa es la materia orgánica renovable de origen vegetal o animal originada durante un proceso biológico (en el caso de la materia vegetal, mediante la fotosíntesis) Serrato Monroy & Cepeda (2016). En general la biomasa incluye cualquier material biológico derivado de organismos vivos o recientemente vivos como: madera virgen, cultivos energéticos, residuos agrícolas, partes de plantas (ramas, tallos, cáscaras, hojas), desechos de alimentos, plantas acuáticas, desechos industriales y desechos animales (Kurchania, 2012; Valdez-Vazquez *et al.*, 2010).

La biomasa se puede clasificar como:

1. Forestal: proveniente de bosques naturales o bosques sembrados.
2. Agrícola: residuos generados de cultivos agrícolas como maíz, sorgo y trigo.
3. Acuática: plantas acuáticas y algas. Generalmente se obtiene biogás a partir de la digestión anaeróbica.
4. Residuos urbanos: vertimientos biodegradables, como aguas residuales e industriales y residuos ganaderos. También basura orgánica proveniente de actividades industriales, comerciales y residenciales.

De acuerdo con Kurchania (2012) la biomasa es el cuarto recurso energético más grande después del carbón, el petróleo y el gas natural aunque en Chen *et al.* (2009) aparece como el tercer lugar después del carbón y el petróleo. Rosillo-Calle (2007) afirma que la biomasa seguirá siendo una de

las principales fuentes de energía en el mundo, por ejemplo, en países como Burundi, Etiopía, Nepal, Ruanda, Sudán y Tanzania obtienen más del 95 % de su energía primaria mediante biomasa además Rosillo-Calle (2007) agrega que la utilización de biomasa se mantiene estable o en crecimiento por tres razones: 1) el crecimiento de la población, 2) la urbanización y 3) las preocupaciones ambientales.

La biomasa tiene una amplia gama de usos que Rosillo-Calle (2007) resume como las 6 f's (*food, feed, fuel, feedstock, fibre y fertilizer* es decir, alimento, pastura, combustible, materia prima, fibra y fertilizante), estas a su vez generan una séptima f, finanzas o fondos económicos.

A continuación se presentan una serie de ventajas y desventajas de la biomasa como biocombustible:

Ventajas

1. Es ampliamente disponible (Kurchania, 2012).
2. La tecnología para su producción y conversión es entendible (Kurchania, 2012).
3. Es adecuada para aplicaciones pequeñas o grandes (Kurchania, 2012).
4. Ventajas de almacenamiento y transporte (Kurchania, 2012; Torres & Navarro, 2010).
5. Comparativamente, se considera contaminación menor o insignificante (Kurchania, 2012).
6. Los costos son bajos (Rosillo-Calle, 2007).

Desventajas

1. Bajo poder calórico de esta fuente energética (IDAE, 2007).
2. Alto porcentaje de humedad (IDAE, 2007).
3. Gran contenido de volátiles (IDAE, 2007).

2.1.1. Residuos agrícolas

La biomasa de interés en este trabajo fueron los residuos agrícolas, de acuerdo a la clasificación de bioenergía de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) este tipo de residuos son denominados agro-combustibles (Rosillo-Calle, 2007). La biomasa residual agrícola es la biomasa generada durante la producción y cosecha de un cultivo y que no representa ningún valor ni utilidad para el agricultor (Serrato Monroy & Cepeda, 2016).

Globalmente alrededor del 40 % de residuos potencialmente disponibles son generados por la actividad agrícola (Rosillo-Calle, 2007). En el caso de Latino América y el Caribe, México es el tercer país más grande en cuanto a área cultivada se refiere (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). El sector agrícola genera una cantidad importante de residuos a nivel nacional, 640 mil toneladas en su mayoría de cultivos de maíz (4.7 ton/ha nivel nacional 7.5 ton/ha en riego 2.2 ton/ha en temporal), trigo (4.8 ton/ha los rendimientos oscilan entre 5 y 5.7 ton/ha), frijol, sorgo (3.4 t/ha oscilan entre 3.7 y 3.9) y café (SAGARPA, 2015). De 2008 a 2011 se registraron los siguientes porcentajes de generación de rastrojo a nivel nacional: maíz 68 %, sorgo 19 % y trigo 11 % (SAGARPA, 2015). Valdez-Vazquez *et al.* (2010) calcularon 75.73 millones de toneladas de residuos generados por 20 tipos de cultivos diferentes en México, 60.13 millones de toneladas de residuos, que denominan residuos primarios, son en su mayoría de paja de maíz, sorgo y trigo y cáscaras y hojas de caña de azúcar. De residuos secundarios estimaron 16.6 millones de toneladas siendo los siguientes los mayores contribuidores: bagazo de caña de azúcar, mazorcas de maíz, bagazo de maguey y pulpa de café.

En algunos estudios donde estiman cantidades de residuos agrícolas incluyen a los cultivos de maíz, sorgo y/o trigo dentro de los mayores generadores, por ejemplo: Lora & Andrade (2009) calcularon 41.4 millones de toneladas de mazorca y tallo de maíz y 3.2 millones de toneladas de paja de trigo, al año en Brasil. Serrato Monroy & Cepeda (2016); Md. Mizanur & Paatero (2012); Jiang *et al.* (2012); Scarlat *et al.* (2010); Singh & Gu (2010) y Lora & Andrade (2009) incluyen maíz y trigo. Valdez-Vazquez *et al.* (2010), además de otros cultivos como el de la caña, toma en cuenta los de sorgo, maíz y trigo. Fernandes & Costa (2010) calcularon un potencial de 7,973 ton/año de residuos agrícolas en Marvão, Portugal además de 2,634 ton/año provenientes de residuos forestales.

Los residuos son un recurso de energía potencial grande casi siempre

subestimado, y representan muchas oportunidades para una mejor utilización (Rosillo-Calle, 2007). Los principales usos competitivos de los residuos agrícolas incluyen alimento y establo para ganado, cultivo de hongos, acolchado superficial en horticultura, mantillo, quema, composta y usos industriales (SAGARPA, 2015; Scarlet *et al.*, 2010; Valdez-Vazquez *et al.*, 2010). En China, algunos residuos agrícolas como la paja, se pudren en el campo o se queman mientras que en otros países como el Reino Unido los aprovechan en plantas modernas de combustión (Rosillo-Calle, 2007).

2.2. Bioenergía a partir de residuos agrícolas

Por la composición de la biomasa, los residuos agrícolas pueden ser aprovechados para la generación de energía eléctrica, calor o biogás a partir de procesos como la combustión, gasificación o pirólisis que son los métodos más comunes de conversión de biomasa a bioenergía (Serrato Monroy & Cepeda, 2016). La cantidad de energía que de ellos puede extraerse depende principalmente de: 1) la cantidad de residuos, 2) el poder calorífico y 3) la humedad. En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se presentan dichos valores para cultivos de maíz, sorgo y trigo, los datos se tomaron de las diferentes fuentes que ahí se muestran. La mayoría de las fuentes sólo tienen información de residuos de maíz y trigo, algunos trabajan con valores generales y otros incluyen valores específicos para los diferentes tipos de residuos como son la paja, el tallo, la mazorca o la cáscara.

Factor de residuos			
Fuente	Maíz (paja, tallo, mazorca, cáscara)	Sorgo (paja)	Trigo (paja, tallo, vaina)
Serrato Monroy & Cepeda (2016)	(0.934, 0.270, NA, NA)	NA	NA
SAGARPA (2015)	0.55-1.2	0.47-1.75	NA
SAGARPA (2015)	1.8	1.5	1.2
SAGARPA (2015)	2.0	1.7	1.2
Md. Mizanur & Paatero (2012)	(NA,2.0, 0.27, 0.20)	NA	(1.75, NA, NA)
Scarlat <i>et al.</i> (2010)	0.7-2	NA	0.6-1.75
Jiang <i>et al.</i> (2012)	2	NA	1.1
Singh & Gu (2010)	(NA, 2, 0.3, NA)	NA	(NA, 1.5, 0.3)
Valdez-Vazquez <i>et al.</i> (2010)	(1.5,NA, 0.3, NA)	1.5	1.5
Chen <i>et al.</i> (2009)	2	NA	1.336
Lora & Andrade (2009)	(NA, 1, 1, NA)	NA	(1.3, NA,NA)
Ghilardi <i>et al.</i> (2006)	1.5	1.5	1.5
Purohit <i>et al.</i> (2006)	NA, 1.56, 0.3, NA	NA	1.47, NA, NA
Matsumura <i>et al.</i> (2005)	1.1	1.57	2.53
Kartha & Larson (2000)	NA, 1.5, 0.3, NA	NA	1.5, NA, NA
Di Blasi <i>et al.</i> (1997)	NA, 1.3, 0.2, NA	NA	0.7, NA, NA

Tabla 2.1: Factores de residuos.

Poder calorífico MJ/kg			
Fuente	Maíz (paja, tallo, mazorca, cáscara)	Sorgo (paja)	Trigo (paja, tallo, vaina)
Valdez-Vazquez <i>et al.</i> (2010); Lora & Andrade (2009)	15	15	15
Rosillo-Calle (2007)	13.0	13.0	13.9
Purohit <i>et al.</i> (2006)	NA, 17.56, 15.23, NA	NA	13.38, NA, NA
Voivontas <i>et al.</i> (2001)	18.4, NA, NA, NA	NA	17.9, NA, NA
Kartha & Larson (2000)	NA, 17.65, 18.77, NA	NA	17.51, NA, NA

Tabla 2.2: Poder calorífico.

Porcentaje de humedad			
Fuente	Maíz (paja, tallo, mazorca, cáscara)	Sorgo (paja)	Trigo (paja, tallo, vaina)
Serrato Monroy & Cepeda (2016)	> 55 %, > 55 %, NA, NA	NA	NA
Md. Mizanur & Paatero (2012)	NA, 12, 15, 11.1	NA	7.5, NA, NA
Scarlat <i>et al.</i> (2010)	30, NA, NA, NA	NA	15, NA, NA, NA
Chen <i>et al.</i> (2009)	11, 16.8, 7.7, NA	15	14.6, NA, NA
Matsumura <i>et al.</i> (2005)	47	60	28
Voivontas <i>et al.</i> (2001)	55, NA, NA, NA	NA	15, NA, NA
Di Blasi <i>et al.</i> (1997)	NA, 55-65, 45-55, NA	NA	10-20, NA, NA

Tabla 2.3: Porcentaje de humedad.

Las aplicaciones pueden ser muchas y en diferentes sectores: 1) en el hogar: cocinas mejoradas, uso de biogás, etanol, etc. 2) En pequeñas industrias: fabricación de ladrillos, panaderías, cerámicas, curado de tabaco, etc. 3) En grandes industrias: generación y/o abastecimiento de calor y electricidad (Cerdá, 2012; Rosillo-Calle, 2007). Es importante que se fomente la implementación de estas tecnologías ya que la utilización tradicional de la biomasa en su forma “en bruto” es ineficiente y se desperdicia gran parte de la energía disponible, además puede asociarse con impactos ambientales negativos (Rosillo-Calle, 2007) por otra parte, como mencionan Valdez-Vazquez *et al.* (2010), existen tecnologías suficientemente avanzadas que se pueden implementar inmediatamente.

Valdez-Vazquez *et al.* (2010) mencionan que México genera los suficientes residuos para utilizarlos con fines energéticos, identificaron algunos municipios de México en los que se podrían instalar plantas con una capacidad de 78 MW (vía combustión directa) o la obtención de 0.3 millones de m^3 de bioetanol por año (a través de fermentación anaeróbica).

Dada la cantidad de residuos que se generan por la actividad agrícola, son varios los que se han interesado en estimar su potencial para la generación de bioenergía. En el caso de Portugal, Fernandes & Costa (2010) analizaron el uso de residuos forestales y agrícolas para reemplazar el sistema de calefacción a base de petróleo en un hotel de Marvao, Portugal, por un sistema de calefacción a base de biomasa concluyendo que el último tendría ventajas económicas y medioambientales para los inversores locales. Lora &

Andrade (2009) calcularon los potenciales energéticos máximo (9271.77 MW, considerando una eficiencia de conversión del 20 % y una fracción de residuo recuperable del 70 %) y mínimo (4967.02 MW con una eficiencia de conversión del 15 % y la posibilidad del 50 % de recuperar los residuos) de algunos residuos agrícolas considerando que tenían un valor calorífico de 15 MJkg^{-1} . Para 2009, en el sur de Brasil ya existían varias centrales térmicas de ciclo de vapor, a base de cáscaras de arroz, cada una con algunos MW de capacidad.

La bioenergía tiene que enfrentar muchas barreras desde socioeconómicas, culturales e institucionales hasta técnicas (Rosillo-Calle, 2007):

1. Posible destrucción de bosques debido al crecimiento de aplicaciones comerciales de la bioenergía.
2. Problemas en la salud humana debido a dioxinas.
3. Posibles efectos nocivos en los recursos hídricos por plantaciones de energía a gran escala.
4. Posibles efectos sobre los suelos por la continua sustracción de residuos para la generación de energía.
5. Posibles problemas de monocultivo que proponen las plantaciones de energía a gran escala.
6. Posible efecto del transporte de grandes cantidades de biomasa (aumento del tráfico)
7. Posible competencia por la tierra entre cultivos de alimentos y cultivos de combustibles.
8. El problema de mantener una alta productividad de forma sostenible durante largos periodos.

Como todas las formas de energía la bioenergía tiene ventajas y desventajas:

Ventajas

1. La combustión de biomasa, a diferencia de los combustibles fósiles no altera la composición de la atmósfera. (Serrato Monroy & Cepeda, 2016). No contribuye a la acumulación de CO_2 en la atmósfera (Singh & Gu,

2010; Torres & Navarro, 2010) porque el CO_2 desprendido en la combustión es compensado con el absorbido durante el crecimiento de la planta (Rosillo-Calle, 2007), además el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual y no del subsuelo como el del gas o el petróleo (IDAE, 2007). Con una central de generación eléctrica de 5 MW se evita la emisión a la atmósfera de unas 14.000 ton/año de CO_2 (Torres & Navarro, 2010).

2. Durante el proceso también se emiten algunos óxidos de nitrógeno, pero son más bajos que las cantidades emitidas por combustibles fósiles (Kurchania, 2012).
3. La producción de energía con biomasa residual podría ser la mejor opción ambiental (mitigación de emisiones de GEI) y social para el sector rural (beneficios económicos) (Alemán-Nava *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2012).
4. Reducción de pobreza energética (Jiang *et al.*, 2012).
5. Los procesos de conversión térmica y las centrales de gas a partir de biomasa pueden dar solución a los problemas energéticos debidos al aumento de demanda de combustibles derivados del petróleo (Singh & Gu, 2010).
6. Reduce el problema de manejo y disposición de residuos biomásicos (Torres & Navarro, 2010).
7. Baja peligrosidad de las emisiones (ausencia de cloro y azufre en la biomasa), Torres & Navarro (2010).

Desventajas

1. Comparados con la madera los residuos agrícolas contienen menos cantidad de carbono C e hidrógeno H (estos elementos influyen en el valor de calentamiento del combustible) y tienen mayor contenido de cenizas lo que repercute durante el proceso de combustión y eficiencia de la caldera además de generar elementos inorgánicos como nitrógeno, azufre y cloro (Fournel *et al.*, 2015).
2. La generación de electricidad a partir de biomasa necesita de sistemas más complejos que los de los combustibles fósiles debido al bajo poder calorífico de la biomasa, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido en volátiles. Debido a lo anterior se requieren inversiones elevadas (IDAE, 2007).

3. La competencia de los usos de la biomasa reducen la disponibilidad efectiva de la misma para usos energéticos (Alemán-Nava *et al.*, 2014).

Para desarrollar un sistema de bioenergía es necesario realizar un análisis con el fin de determinar la oferta de biomasa, la tecnología más adecuada y sostenible (de acuerdo a las características de la región) y los problemas que se tienen que enfrentar, desde los sociales hasta los relacionados con la generación de energía (Alemán-Nava *et al.*, 2014). Las tecnologías más adecuadas para convertir la biomasa en energía dependen, entre otros factores de: 1) la clase de biomasa, 2) el contenido de humedad, 3) el proceso de conversión y 4) el uso final del producto energético (Lora & Andrade, 2009). Para este trabajo estimamos el potencial de generación de energía eléctrica a partir de la combustión y la gasificación.

2.2.1. Combustión directa

La combustión es la forma más utilizada y tradicional de aprovechar la biomasa, considerada carbono neutral, porque las emisiones generadas durante el proceso mantienen un equilibrio con el CO_2 que las plantas o árboles almacenaron durante su desarrollo (Serrato Monroy & Cepeda, 2016).

La combustión es una reacción mediante la cual los combustibles son oxidados. En la mayoría de sus aplicaciones técnicas se tiene como objetivo obtener la mayor cantidad posible de calor, aunque también se generan otros componentes indeseados como los contaminantes atmosféricos (Márquez, 2005).

La biomasa se quema en una caldera para producir vapor, el carbono e hidrógeno contenidos en el combustible reaccionan con el oxígeno formando CO_2 y agua y se libera calor (Cerdá, 2012), al aumentar la presión el vapor viaja a una turbina para generar el movimiento de la misma (energía mecánica). La energía mecánica permite el funcionamiento de un generador eléctrico para obtener energía eléctrica (Serrato Monroy & Cepeda, 2016).

De acuerdo con Rosillo-Calle (2007), las tecnologías de combustión producen alrededor del 90 % de la energía a partir de biomasa y convierten biocombustibles en diferentes formas útiles de energía. Aunque las instalaciones que producen electricidad mediante generadores de turbinas impulsadas por vapor, tienen una eficiencia entre el 15 y 38 % según Serrato Monroy & Cepeda (2016) o entre el 15 % y el 40 % de acuerdo con Rosillo-Calle (2007). Aquellas tecnologías que generan calor mediante biocombustibles tienen eficiencias

térmicas mayores al 70 % u 80 % (Serrato Monroy & Cepeda, 2016; Rosillo-Calle, 2007). La elección y el diseño de los sistemas de combustión dependen de: las características de los biocombustibles, las limitaciones ambientales, el costo del equipo y el tamaño de la planta. Los objetivos principales de la combustión son la reducción de emisiones y la eficiencia (Rosillo-Calle, 2007).

Hasta 2009 la combustión directa de residuos agrícolas era la principal forma de bioenergía en China, pero con eficiencias térmicas bajas por lo que se desperdiciaban los recursos bioenergéticos. Además, con eficiencias de conversión del 40 % y con emisiones de partículas en los gases de combustión, por lo que analizaron la biomasa como fuente para la fabricación de briquetas la cual sería una ruta importante para la utilización eficiente de residuos agrícolas (Chen *et al.*, 2009).

2.2.2. Gasificación

La gasificación es uno de los estudios más importantes en el área de biomasa para la generación de electricidad. Es una tecnología de conversión endotérmica que convierte combustibles sólidos en un gas combustible conocido como gas de síntesis. Puede incorporar turbinas avanzadas y generadores de vapor de recuperación de calor para lograr altas eficiencias energéticas (Rosillo-Calle, 2007). La tecnología utilizada tiene una potencia de 30 kW a 40 MW (Serrato Monroy & Cepeda, 2016).

Mediante altas temperaturas la biomasa es transformada en gas. El proceso se da en dos etapas (Kurchania, 2012):

1. La biomasa se quema parcialmente para formar gas y carbón.
2. El CO_2 y H_2O producido en la primera etapa se reducen químicamente por el efecto del carbón y se forman CO (monóxido de carbono) y H_2 (hidrógeno). La composición del gas es 18-20% H_2 , lo mismo para el CO, 2-3% de CH_4 (metano), 8-10% de CO_2 (dióxido de carbono) y el resto de nitrógeno.

Las dos etapas están separadas espacialmente en el gasificador. El gasificador funciona con temperaturas alrededor de $800^\circ C$. Con presiones iguales a la atmosférica o mayores.

El poder calorífico del gas de síntesis depende del medio que se emplee en la gasificación, cuando se gasifica biomasa mediante aire soplado el poder

calorífico alcanza de 4 MJ/m^3 a 7 MJ/m^3 (Solarte-Toro *et al.*, 2018), estos valores son bajos comparados con los del gas natural (30 MJ/m^3). Cuando se utilizan oxígeno y vapor para realizar la gasificación de la biomasa, el poder calorífico que se obtiene de los gases de síntesis puede variar entre $10\text{-}18 \text{ MJ/m}^3$ y $12\text{-}28 \text{ MJ/m}^3$ para vapor y oxígeno, respectivamente (Solarte-Toro *et al.*, 2018). El gas generado se puede utilizar en plantas para la generación de electricidad.

Los sistemas compuestos de gasificador y turbinas son atractivos para la producción de energía eléctrica ya que su eficiencia es comparable y de menor costo que la electricidad derivada de combustibles fósiles (Kurchania, 2012).

Las principales razones por las que la combustión es una opción atractiva son las siguientes (Rosillo-Calle, 2007):

1. Mayor eficiencia eléctrica (40 % o más a comparación de los sistemas de combustión que tienen entre el 15 y 40 %) cuando los costos son muy parecidos.
2. Desarrollos importantes como las turbinas de gas avanzadas y pilas de combustible.
3. Posible reemplazo del gas natural o combustible diésel utilizado en calderas industriales y hornos.
4. Generación de energía distribuida donde la demanda de energía es baja.
5. Desplazamiento de gasolina o diésel en un motor de combustión interna.
6. La gasificación es más eficiente que la combustión ya que proporciona calor más controlado, mayores eficiencias en la producción de electricidad y tiene la posibilidad de producir a su vez combustibles y productos químicos (Cerdá, 2012).

2.2.3. Características de los sistemas de conversión

En el caso de tecnologías para generación de electricidad a partir de quema de biomasa, Valdez-Vazquez *et al.* (2010) establecen tres categorías de la potencia de las plantas que se podrían instalar en municipios de acuerdo a la cantidad de residuos disponibles:

1. Municipios que tienen un potencial de biomasa entre 140 y 5,600 ton/año podrían abastecer una planta de generación de electricidad de 5-200 kW (ciclo de combustión / vapor, el motor de gasificación / combustión interna y el motor de combustión / *stirling*).
2. Municipios que tienen un potencial de biomasa entre 5,600.1 y 28,000 ton/año podrían abastecer una planta de generación de electricidad de 200-999 kW (ciclo de combustión / vapor y el motor de gasificación / combustión interna).
3. Municipios con un potencial de biomasa entre 28,000.1 y 2,181,021 ton/año son útiles para una planta con una instalación que varía de 1 a 78 MW; esta capacidad es comparable a la de las plantas de generación diesel o geotérmicas.

En el análisis de Lora & Andrade (2009) sobre las tecnologías de conversión de biomasa a bioenergía, concluyen que aquellas que tienen madurez tecnológica alta y mediana y factibilidad económica, son el ciclo de vapor, la gasificación con combustión interna y motor Stirling y los motores de biodiesel/combustión interna. Para sistemas de energía pequeños (5-200 kW), no se dispone de tecnologías con alta madurez tecnológica y viabilidad económica.

2.3. Técnicas de teledetección para la estimación de biomasa

Cuando se aborda el tema de la estimación del potencial de la biomasa, los diversos estudios existentes, presentan diferencias ya que el problema depende de más de un factor, comenzando con las dificultades para estimar la disponibilidad de los recursos. Al momento de considerar residuos agrícolas para la producción de energía es necesario tener en cuenta lo siguiente: 1) la relación entre el rendimiento y la superficie total agrícola, 2) los usos alternativos como la alimentación animal, el control de erosión, el uso como camas para animales, etc., 3) el tipo de sistema de producción y 4) que no está claro qué cantidad de residuos está disponible, ya que no existe una metodología común para determinar qué es y qué no es residuo recuperable (Rosillo-Calle, 2007).

Estudios como los de Md. Mizanur & Paatero (2012); Jiang *et al.* (2012); Fernandes & Costa (2010); Scarlat *et al.* (2010); Singh & Gu (2010); Valdez-Vazquez *et al.* (2010); Chen *et al.* (2009); Lora & Andrade (2009); Matsumura *et al.* (2005); Voivontas *et al.* (2001), se han apoyado en las bases de datos

existentes en los departamentos u organizaciones de agricultura correspondientes para estimar las cantidades de residuos generados por diversos tipos de cultivos. Dentro de los trabajos mencionados anteriormente Jiang *et al.* (2012); Valdez-Vazquez *et al.* (2010); Fernandes & Costa (2010); Voivontas *et al.* (2001) incorporan el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG's), pero sólo como una herramienta para ilustrar o mostrar sus resultados geográficamente, en el caso de Jiang *et al.* (2012) lo utilizaron para simular la distribución de residuos agrícolas en China, Valdez-Vazquez *et al.* (2010) crearon mapas para representar el potencial de los residuos de los cultivos.

De acuerdo con Fernandes & Costa (2010) los SIG's ayudan a comprender varios temas relacionados con la bioenergía en un contexto geográfico (ya que los resúmenes estadísticos y gráficos de datos en formato de mapa permiten una mejor ilustración o percepción de los resultados, Voivontas *et al.* (2001)), por ejemplo en Fernandes & Costa (2010), ilustran la demanda de energía y las fuentes de biomasa. Además en un SIG se pueden almacenar, manejar, ajustar y relacionar grandes cantidades de datos de manera sencilla y eficiente. Una ventaja más del uso de modelos de biomasa en SIG es que permite contar sin errores la variación de los rasgos geográficos que influyen en el suministro y costo de la producción de biomasa, gracias a lo anterior el uso de SIG's facilita la toma de decisiones.

En el caso de este trabajo, se optó por obtener información (es decir, distribución de las zonas cultivadas con maíz, sorgo o trigo en Angamacutiro) mediante teledetección ya que no se cuenta con una base de datos a nivel municipal y para obtener los resultados se manejaron datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG's) como QGIS, ArcMap, y RStudio.

La teledetección es un conjunto de técnicas que permiten la obtención de información a distancia, midiendo la reflectancia de un objeto o un área geográfica, para lo cual se utiliza un sensor plantado en una plataforma (por ejemplo un avión, un satélite o un dron), además la teledetección incluye los procesos para el tratamiento posterior de los datos obtenidos (Jensen, 2007; Chuvieco, 1995). Los objetos situados sobre la superficie terrestre reflejan y absorben de manera diferente en diferentes longitudes de onda, por lo tanto se pueden caracterizar por sus firmas de reflectancia espectral (Rosillo-Calle, 2007). Como se mencionó anteriormente dentro de los diferentes tipos de sensores están los satélites, en general se pueden distinguir los siguientes dos:

Pasivos. Detectan la energía del sol que reflejan los objetos de la superficie.

Activos. Emiten energía propia por lo que pueden coleccionar información en todo momento, de día y de noche.

Además se pueden caracterizar por los siguientes atributos:

1. **Resolución espacial.** Se refiere al tamaño de los píxeles (tamaño mínimo de un objeto para ser capturado en la imagen). A menor tamaño de píxel, mayor resolución. La resolución espacial se mide en unidades de longitud (mm sobre la imagen, ó metros sobre el terreno), Chuvieco (1995).
2. **Resolución temporal.** Es el tiempo que el sensor tarda en hacer una nueva toma en un mismo lugar (o en darle la vuelta a la Tierra). La frecuencia de los sensores depende los objetivos que se ha fijado el sensor. Dado que los fenómenos meteorológicos son dinámicos los satélites meteorológicos deben proporcionar información frecuentemente (Chuvieco, 1995).
3. **Resolución radiométrica.** Se refiere a la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad para detectar las variaciones de la radiancia espectral que recibe. La mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel (de 0 a 255) aunque algunos autores han demostrado que el aumento de 64 a 356 niveles no implica una mejora significativa en la clasificación de cubiertas vegetales (Chuvieco, 1995).
4. **Resolución espectral.** Es el número y ancho de las bandas espectrales que puede registrar el sensor. La elección de estas propiedades dependen del objetivo del diseño del sensor. Por ejemplo, en el caso de un sensor dedicado a fines meteorológicos, basta situar una banda en el visible, ya que no existen diferencias cromáticas en las nubes. Al contrario, es necesario incluir una o dos bandas en el térmico (para conocer la temperatura de las nubes), y otra en el infrarrojo medio por que permite observar el contenido de humedad en la atmósfera (Chuvieco, 1995).

Borràs *et al.* (2017), asegura que la resolución espacial y radiométrica del satélite Sentinel S2 mejora los resultados en la clasificación de imágenes en comparación con las características del satélite SPOT. Y también concluye que el método Random Forest es uno de los que mejor clasifica imágenes Sentinel S2.

Random Forest es un método de aprendizaje automatizado (*machine learning*) propuesto por Leo Breiman en 2001, y se define de la siguiente manera:

Definición. Un bosque aleatorio es un clasificador que consiste en una colección de clasificadores estructurados por árboles $\{h(x, \Theta_k), k = 1, \dots\}$ donde los $\{\Theta_k\}$ son vectores aleatorios independientes distribuidos de forma idéntica y cada árbol arroja un voto unitario para la clase más popular en la entrada x .

Es decir, el bosque se conforma por un número de árboles binarios de decisión. En cada iteración se construye un árbol mediante un subconjunto diferente extraído aleatoriamente y con reemplazo del conjunto de entrenamiento, cada nodo se divide utilizando la mejor variable de la muestra extraída, a este proceso se le conoce como *Baggin* (Borràs *et al.*, 2017; Gislason *et al.*, 2006; Breiman, 2001).

El número de variables depende del conjunto de entrenamiento dado por el usuario, entre mayor es el número de árboles mayor la robustez de la predicción y por lo tanto mayor precisión (Gislason *et al.*, 2006).

De acuerdo con Gislason *et al.* (2006), Random Forest, es un método conveniente para la clasificación de datos obtenidos mediante teledetección.

Capítulo 3

Área de estudio

El área de estudio es el municipio de Angamacutiro, Michoacán, México; se encuentra entre los paralelos $20^{\circ}02'$ y $20^{\circ}15'$ de latitud norte; los meridianos $101^{\circ}37'$ y $101^{\circ}50'$ de longitud oeste y tiene una altitud de entre 1700 y 2200m. Colinda al norte con el municipio de Pénjamo, Guanajuato, y el municipio de José Sixto Verduzco; al este, con los municipios de José Sixto Verduzco y Puruándiro; al sur, con los municipios de Puruándiro y Panindícuaro; al oeste, con los municipios de Panindícuaro, Penjamillo y con el Estado de Guanajuato. Pertenecce a la Faja Volcánica Transmexicana y tiene una superficie de 24,025 ha (INEGI, 2009). En la Figura 3.1 se puede observar el límite municipal de Angamacutiro, en el cuadro pequeño de la derecha se muestra la zona urbana de la cabecera municipal.

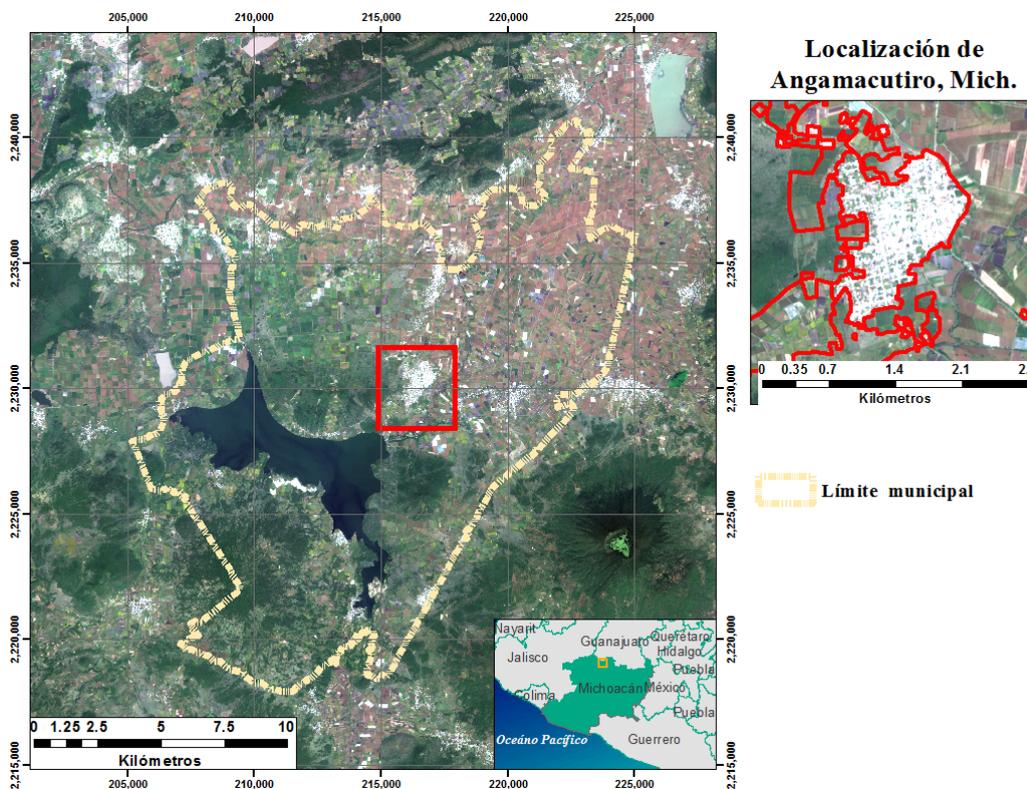


Figura 3.1: Ubicación del municipio de Angamacutiro, Michoacán. Imagen Sentinel 2A, octubre 2017.

3.1. Aspectos sociales

El municipio está constituido por su cabecera municipal, Angamacutiro de la Unión, la tenencia de Santiago Conguripo y veintitrés comunidades: Agua Caliente, Arámutaró de la Cal, Aranjuez, Colonia Héroes de la Revolución, Curícipo, La Estancia del Río, Guadalupe Norte, Guadalupe Sur, El Guayabo Buenavista, Laguna de Cortés, El Maluco, Miravalle, El Nuevo Paraíso, La Palma, El Rosario, El Sabino, San Diego Buenavista, San Ignacio, San José del Maluco, San Pedro, El Troje y la Zapotera de Tunillas.

En el 2010, el municipio de Angamacutiro contaba con un total de 14,684 habitantes de acuerdo con el Censo de Población 2010 (INEGI), específicamente, 7,748 son mujeres y 6,936 son hombres.

3.2. Cubierta vegetal y uso de suelo

El uso de suelo en Angamacutiro es principalmente agrícola (de riego y temporal) y en menor proporción pecuario. Respecto a la estructura de la tenencia de la tierra, la superficie ejidal representa la mayor parte, seguida de la superficie de pequeña propiedad (INEGI, 2009).

En cuanto a la vegetación, domina el matorral subinerme (con mezcla de plantas espinosas y no espinosas), destacando la nopalera, el huizache, el mezquite y cactáceas altas y cilíndricas (INEGI, 2009).

3.3. Hidrografía

Constituida por el río Lerma que delimita la parte norte del municipio con Pénjamo, Gto., el río sirve de drenaje para todo el valle. El río Angulo, que tiene su origen en el municipio de Zacapu, cruza los municipios de Jiménez, Panindícuaro y Angamacutiro; en este último, el cauce del río alimenta el vaso de la presa Melchor Ocampo, continuando rumbo al norte para desembocar su cauce sobre el caudal del río Lerma, esto cerca de la Tenencia de Santiago Conguripo. También cuenta con la presa Melchor Ocampo, que proporciona riego para las cosechas, y con el arroyo Atarjea (INEGI, 2009).

3.4. Clima

El clima que domina en el municipio es el semicálido subhúmedo (INEGI, 2009).

En el ciclo de primavera-verano (marzo-septiembre) se registran las mayores precipitaciones pluviales del año, en promedio la mínima es de 4.8 mm en el mes de abril y la mayor de 177.7 mm en el mes de julio. Las temperaturas mínimas varían en el rango de 14 a 16 grados centígrados y las máximas entre 29° y 33° (CLIMATE-DATA.ORG, 2018).

En el ciclo de otoño-invierno las precipitaciones pluviales son bajas (2.6 mm a 35 mm) y los rangos de temperaturas fluctúan entre 7 y 30 grados centígrados (CLIMATE-DATA.ORG, 2018).

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología para la estimación de la energía eléctrica a partir de la combustión y gasificación de residuos de maíz, sorgo y trigo en Angamacutiro durante los dos ciclos agrícolas de primavera-verano 2017 y otoño-invierno 2017-2018. El capítulo se divide en 4 secciones: Trabajo de campo, Mapa de residuos agrícolas, Oferta espacial y temporal de residuos agrícolas para la generación de energía y Conversión de residuos agrícolas a energía eléctrica.

4.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo durante tres visitas:

1. Visita de reconocimiento. Primero se realizó una investigación en el municipio para saber si había alguna organización encargada del sector agrícola y si existían bases de datos referentes a la producción de maíz, sorgo y trigo. Como resultado, el Director del departamento de Desarrollo Agropecuario proporcionó una lista de los comisariados ejidales del municipio y mencionó que no existía una base de datos sobre la producción agrícola.

Posteriormente, del 11 al 23 de septiembre de 2017, se estuvo aplicando la encuesta del Apéndice A a veinticuatro agricultores pertenecientes a 17 de los 24 ejidos existentes. Mediante la encuesta se obtuvo información de las prácticas y producción agrícolas, así como de los usos actuales de los residuos. Se procuró que los encuestados fungieran como comisariados ejidales o encargados del orden de su respectivo ejido, sin embargo, también se seleccionaron por su conocida experiencia en la actividad agrícola. La mayoría de las

encuestas se llevaron a cabo en cada uno de los domicilios de los agricultores.

2. Recolección de datos de entrenamiento y verificación en octubre 2017. En la semana del 8 al 15 de octubre de 2017 se visitó por segunda vez el municipio para obtener con el GPS los puntos de ubicación de 179 parcelas. 119 de los cultivos seleccionados estaban sembrados con maíz, 57 con sorgo, 2 con alfalfa y 1 con garbanzo. Además de la ubicación se anotó el tipo de cultivo, el tamaño de la planta y su fase fenológica. En la imagen de la Figura 4.1 se observa la distribución de los puntos. Los círculos verdes representan sitios con maíz y los círculos azules puntos tomados en cultivos de sorgo. En total se registraron 119 puntos de maíz, 57 puntos de sorgo, 2 de alfalfa y 1 de garbanzo.

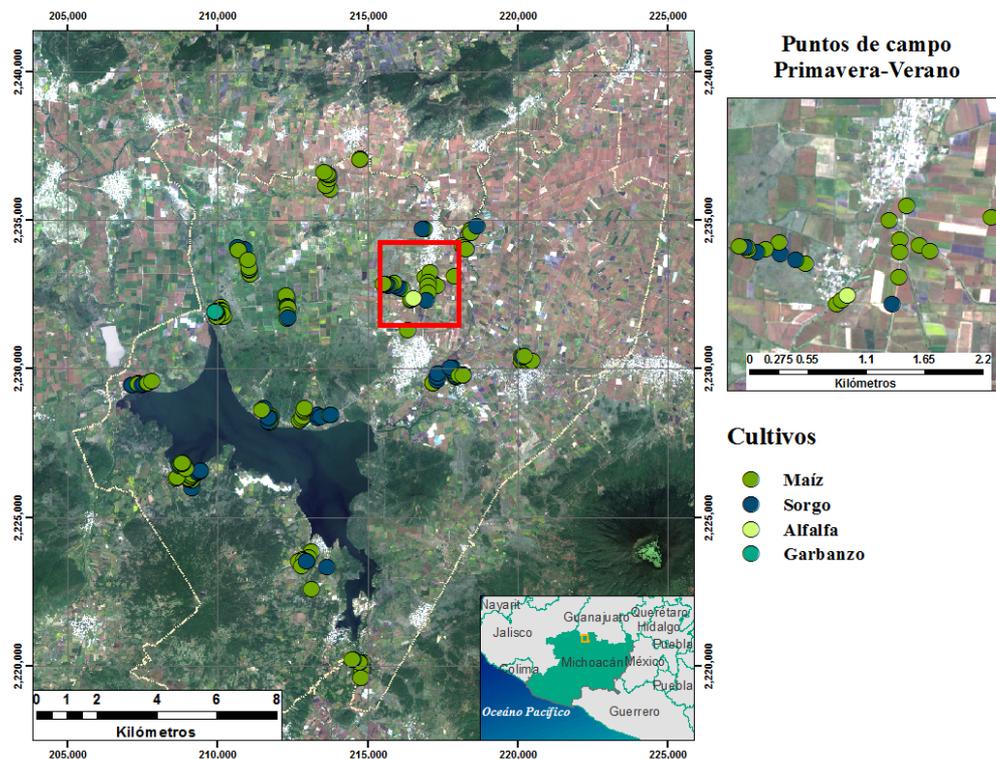


Figura 4.1: Distribución de los puntos primavera-verano tomados en campo.

3. Recolección de datos de entrenamiento y verificación en marzo 2018. A fin de obtener la ubicación y tipo de cultivo de las 226 parcelas en el ciclo otoño-invierno 2017-2018, se realizó una tercera y última visita en la semana del 25 de marzo al 2 de abril de 2018. En esa ocasión se visitaron las 179 par-

celas registradas en octubre además de otras 53, nuevamente la posición de las parcelas se tomó con el GPS. Se registraron 68 puntos de trigo, 28 puntos de avena, 95 puntos de parcelas de temporal que estaban barbechadas o con residuos del ciclo de primavera-verano. También se registraron 7 puntos de alfalfa, 12 de fresa, 5 de frijol, 8 de garbanzo, 6 puntos de maleza (parcelas abandonadas) y 3 de pastizal. La distribución de los puntos se encuentra en la imagen de la Figura 4.2.

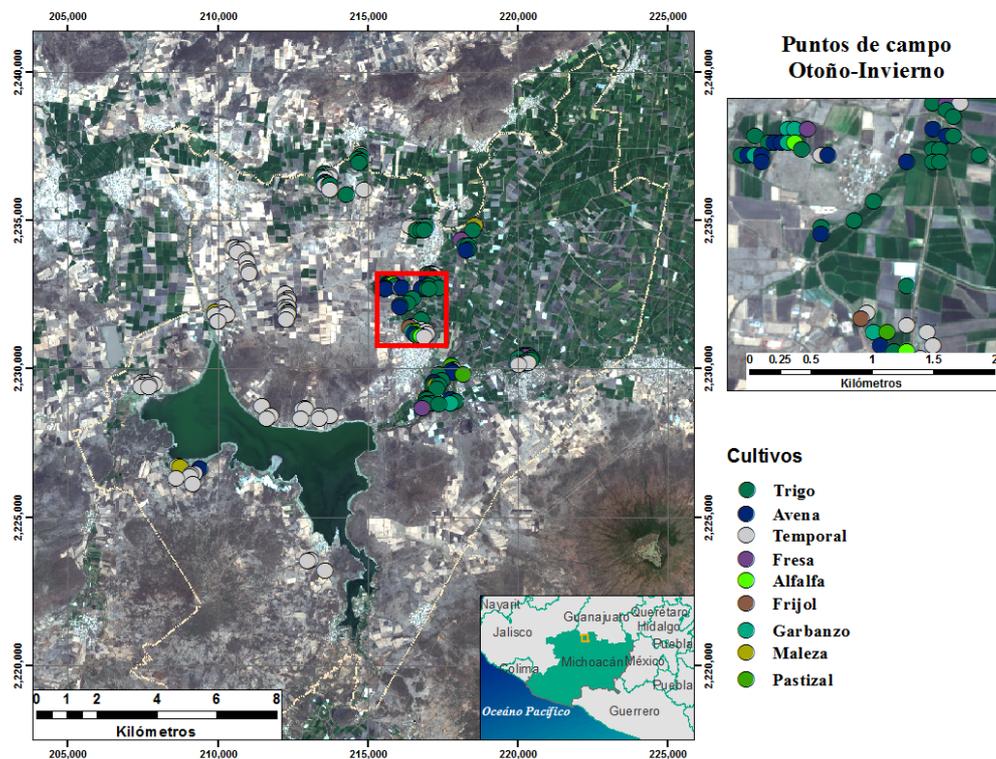


Figura 4.2: Distribución de los puntos otoño-invierno tomados en campo.

La selección de las parcelas se realizó al azar, tratando de tomar aquellas que pertenecieran a los ejidos del municipio, pero también dependió de la accesibilidad a las mismas.

4.2. Mapa de distribución de los cultivos

El primer paso para estimar la cantidad de residuos agrícolas en el municipio, consistió en obtener, la cantidad de hectáreas cultivadas de maíz y sorgo en ciclo primavera-verano 2017 y la cantidad de hectáreas cultivadas con trigo en el ciclo de otoño-invierno 2017-2018. Para ello se realizó una clasificación supervisada con el método Random Forest en el programa RStudio, como se describe a continuación:

4.2.1. Insumos

Se buscaron y descargaron las imágenes Sentinel 2A correspondientes a las fechas de la segunda y tercer visita. A cada una se le aplicó la corrección atmosférica en el programa QGIS. Cada banda se recortó con un polígono rectangular que cubría la superficie del municipio.

Finalmente se realizó un compuesto de bandas, nuevamente en ArcMap, para las dos imágenes Sentinel 2A con las bandas espectrales 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11 y 12. De esta forma resultaron las imágenes de la Figura 4.3. Se muestra el compuesto a color natural RGB, la imagen de la izquierda es la Sentinel 2A de octubre de 2017 y la imagen de la derecha es la Sentinel 2A de marzo de 2018.

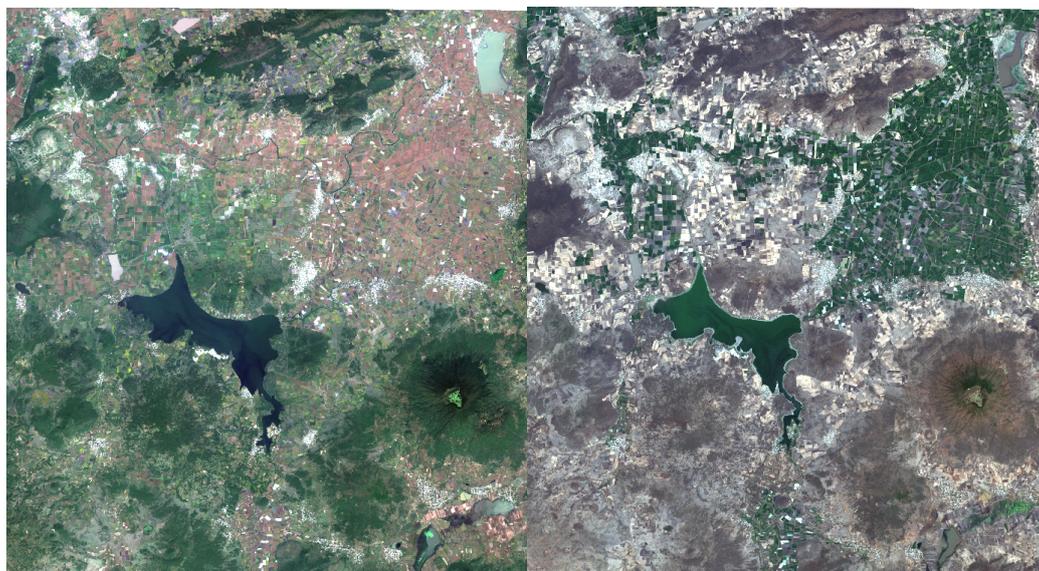


Figura 4.3: Imágenes Sentinel 2A

Con los puntos obtenidos en campo se realizaron dos capas de polígonos en el programa ArcMap. Uno correspondiente a los puntos obtenidos en octubre de 2017 y el otro con base a los puntos obtenidos en marzo de 2018. El tamaño de cada polígono es aproximadamente el mismo que el de cada píxel de la imagen, es decir, de 100 m²:

Capas de polígonos del ciclo primavera-verano 2017. Los polígonos de entrenamiento de octubre de 2017 se clasificaron como indica la Tabla 4.1. La clase Otros corresponde a cultivos de alfalfa, garbanzo o cultivos con maleza. El plástico pertenece a invernaderos o a cultivos de fresa acolchados. La capa de primavera-verano contiene 6857 polígonos, para cada clase se tomaron al azar aproximadamente 50% de parcelas para entrenamiento y 50% de parcelas para verificación.

Clases primavera-verano	
Nomenclatura	cultivo
Maíz	Maíz
Sorgo	Sorgo
Co	Sorgo cosechado
Plas	Plástico
Sue	Suelo desnudo
Otros	Alfalfa, garbanzo o maleza

Tabla 4.1: Clases de los polígonos de entrenamiento y verificación primavera-verano.

En la Figura 4.4 se muestra la distribución de algunos polígonos de entrenamiento y verificación en el ciclo de primavera-verano. En la imagen con marco rojo se pueden distinguir polígonos de entrenamiento y verificación tomados en el ejido de Aramútaro de la Cal, ahí se encontraron maíz y sorgo. Los polígonos negros son los de verificación. En la imagen del marco naranja aparecen cultivos de maíz, sorgo y alfalfa. Estos cultivos son de pequeña propiedad. Las clases de Cosechado, Plástico y Suelo se crearon a partir de la interpretación visual de la imagen.

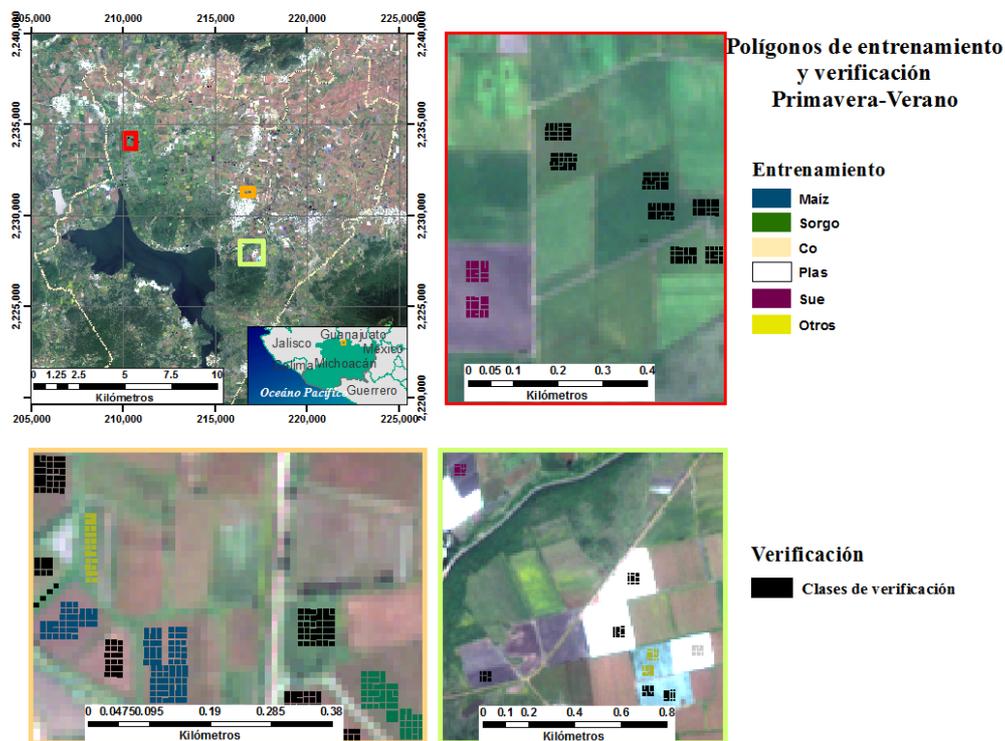


Figura 4.4: Distribución de los polígonos de entrenamiento y verificación primavera-verano.

Capas de polígonos del ciclo otoño-invierno 2017-2018. En el ciclo de otoño invierno se eligieron las clases de la Tabla 4.2, la nomenclatura se eligió para facilitar el reporte de los resultados. La clase Otros1 se refiere a cultivos de fresa o frijol y la clase Otros2 incluye cultivos de alfalfa, garbanzo, maleza o pasto forrajero. En total resultaron 6104 polígonos, nuevamente se tomaron al azar aproximadamente 50% de parcelas para entrenamiento y 50% de parcelas para verificación.

Clases otoño-invierno	
Nomenclatura	cultivo
Trigo	Trigo
Avena	Avena
Re	Residuos
Bar	Barbechado
Plas	Plástico
Otros 1	Fresa o frijol
Otros 2	Alfalfa, garbanzo, pasto forrajero o maleza

Tabla 4.2: Clases de los polígonos de entrenamiento y verificación otoño-invierno.

Para el ciclo de otoño-invierno, la figura 4.5 presenta polígonos de entrenamiento y verificación en los ejidos El Troje (imagen de marco azul), Villa Unión (imagen de marco naranja) y otros más en cultivos de pequeña propiedad (imagen de marco verde). En el caso del Troje los cultivos están barbechados o contienen residuos del ciclo anterior, esto, debido a que el ejido es de temporal. Los demás cultivos que se muestran son de riego y contienen en su mayoría trigo o avena. Nuevamente la clase de Plástico se creó mediante interpretación visual.

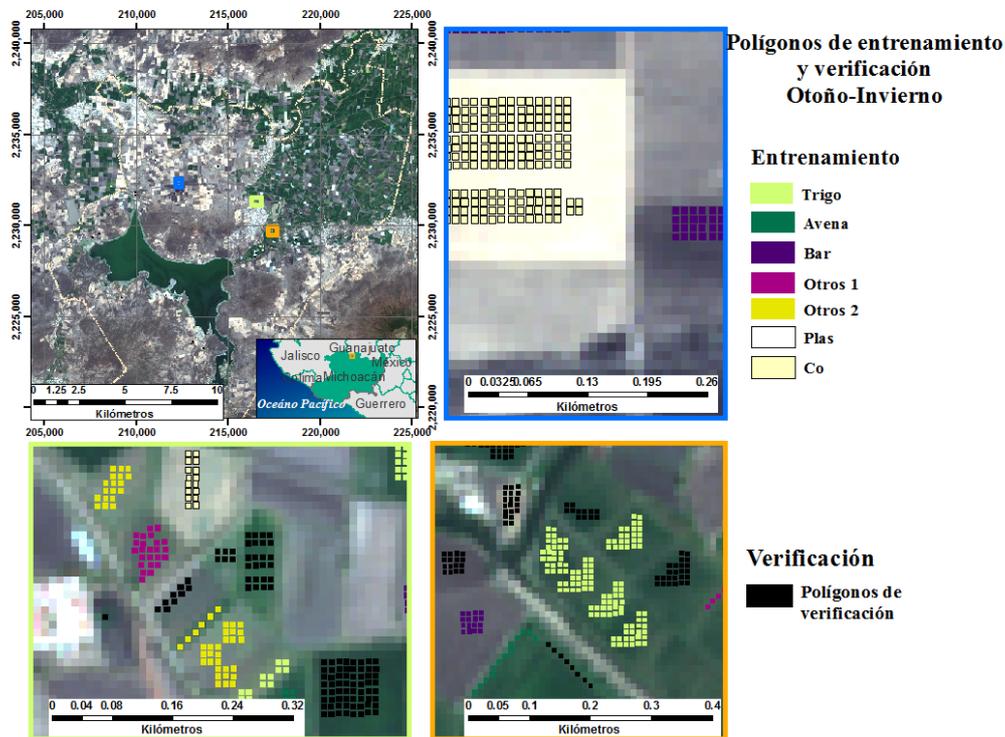


Figura 4.5: Distribución de los polígonos de entrenamiento y verificación otoño-invierno.

Capa de cobertura y uso de suelo

Sobre el compuesto a color natural de la imagen del 22 de octubre, se realizó una digitalización de las principales coberturas y usos de suelo para la superficie de Angamacutiro (agricultura, asentamientos humanos, matorral y presa). Se definió una escala de digitalización de 1:10,000 con un área mínima cartografiada de 0.0016 km^2 y el sistema de proyección WGS 1984 UTM zona 14.

El mapa de la figura 4.6 presenta las 4 categorías principales del municipio: agricultura (12,609.51 ha), asentamientos humanos (582.75 ha), matorral (8,752.59 ha) y cuerpos de agua (2,113.07 ha). El recuadro de la derecha muestra la escala a la que se trabajó (1:10,000).

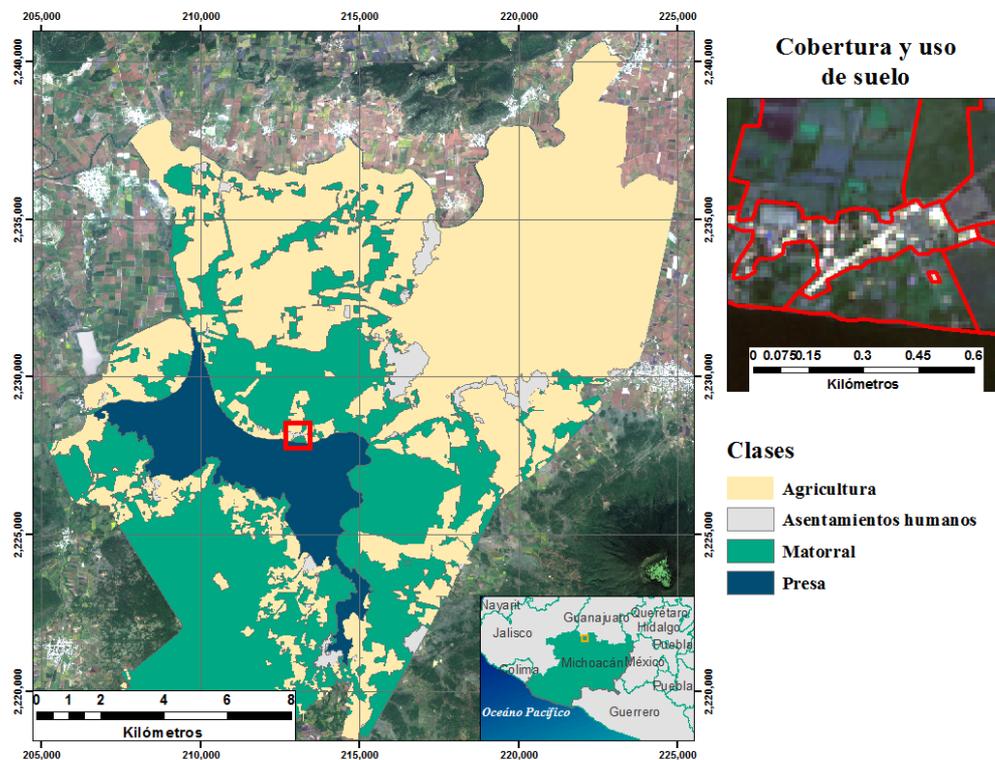


Figura 4.6: Digitalización de la cobertura y uso del suelo.

Posteriormente, se eliminaron los asentamientos urbanos, la zona de matorral y la presa, para seguir trabajando únicamente con la capa de la zona agrícola de Angamacutiro. Sobre la capa de agricultura se realizó la digitalización a 1:5,000 para marcar ríos, caminos y canales. Finalmente resultó la capa agrícola sin ríos, caminos ni canales de la Figura 4.7. El cuadro de la derecha muestra la capa a escala 1:5,000, en el centro se puede observar una parte del río Angulo y a la derecha de éste, el inicio de uno de los canales de riego principales.

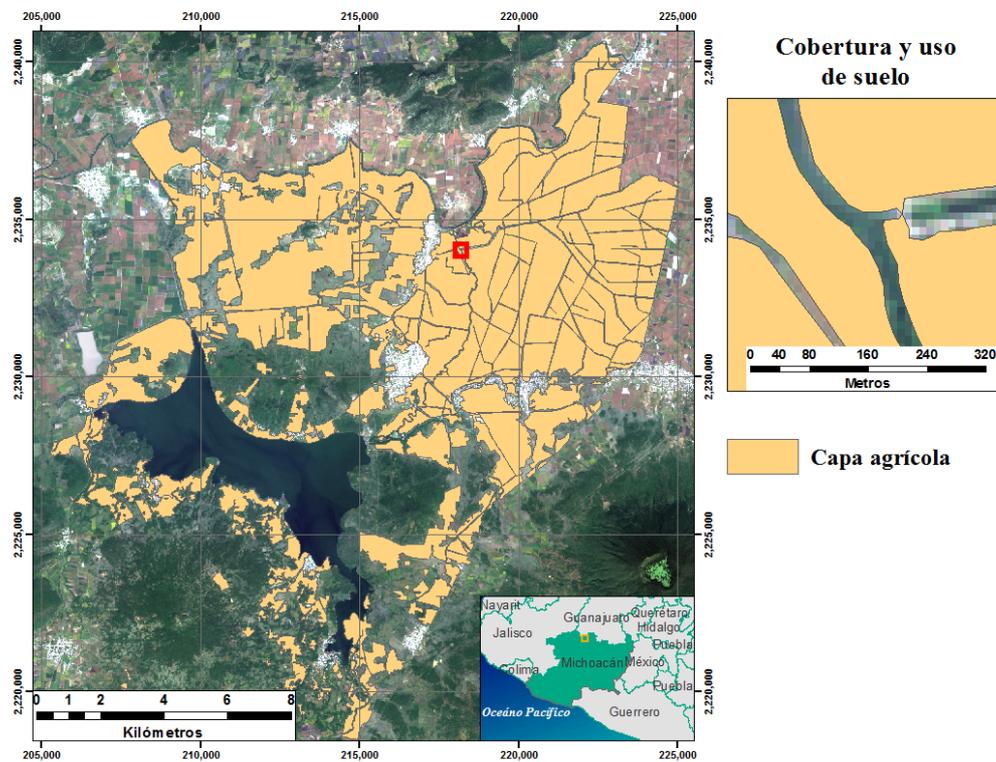


Figura 4.7: Capa de agricultura sin ríos, caminos ni canales.

Después de recortar las imágenes de la Figura 4.3 (compuestos RGB) con la capa generada anteriormente; resultaron las imágenes de la Figura 4.8.

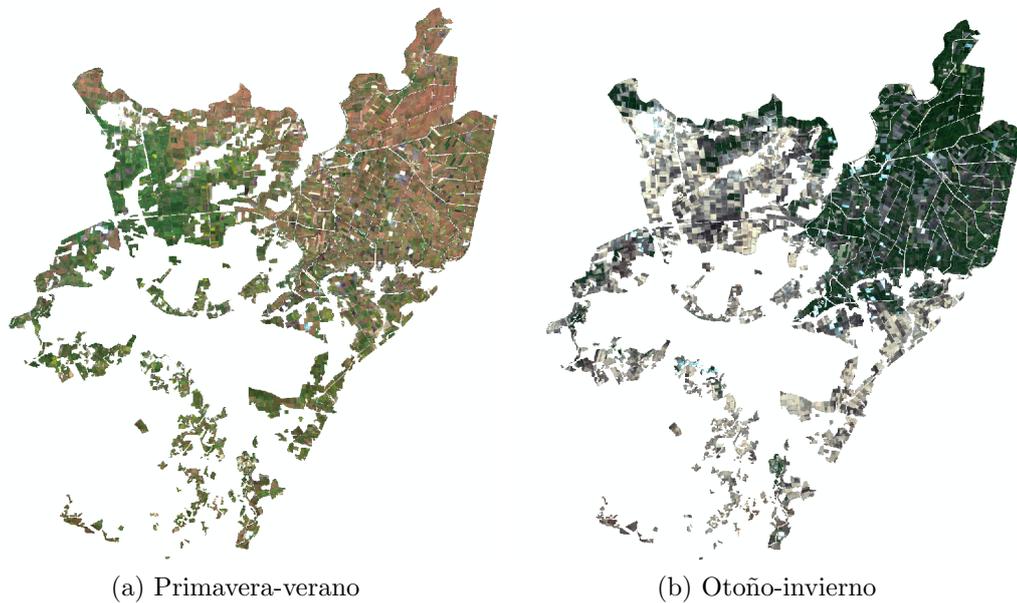


Figura 4.8: Capas ráster de la zona agrícola.

Capa de la zona agrícola del municipio

4.2.2. Clasificación Supervisada

Con las capas de polígonos de entrenamiento y los compuestos de la capa agrícola de los dos ciclos productivos, se realizó la clasificación supervisada con el método Random Forest. Obteniendo así la clasificación de primavera-verano 2017 y la clasificación de otoño-invierno 2017-2018.

Con el objetivo mejorar los resultados de la clasificación se aplicaron, en el siguiente orden, mediante ArcMap, los procesos:

1. *Majority Filter*
2. *Region Group*
3. *Set Null*
4. *Nibble*

Como las clasificaciones se obtuvieron en formato imagen se tuvieron que convertir a formato shape para agregar, en sus tablas de atributos, el

campo *Area_ha*, y mediante la función *Calculate Geometry*, se calculó en hectáreas el área de cada zona en la clasificación. Y de esa manera se obtuvo la distribución de hectáreas sembradas con maíz, sorgo y trigo.

4.2.3. Evaluación de los resultados de la clasificación

Un aspecto importante en la teledetección, es la evaluación de la fiabilidad de los resultados, lo cual se puede traducir en valorar que tan bueno es un mapa. La obtención de un buen mapa permite tomar decisiones críticas sobre los recursos en los que se está interesado. Además, la evaluación permite comparar técnicas o algoritmos o realizar cambios que disminuyan los errores y mejoren los resultados (Congalton & Green, 2009).

Para evaluar el resultado de cada clasificación, se generó la matriz de confusión de cada ciclo en ArcMap, mediante la función *Tabulate Area*, para lo cual se utilizaron las capas generadas en el paso anterior y los polígonos de verificación.

Los cálculos de la precisión global, las exactitudes de usuario y productor, los errores de comisión y omisión, el análisis Kappa y los intervalos de confianza, se llevaron a cabo en el programa Excel de acuerdo a lo siguiente:

Matriz de error

La medida más aceptada para evaluar la precisión temática es la matriz de error. La matriz de error es una matriz cuadrada donde las columnas representan datos de referencia (considerados correctos o verdaderos) y las filas representan los resultados de la clasificación generada mediante teledetección. Este arreglo matricial permite comparar los datos de referencia con los resultados facilitando la comprensión de la precisión del mapa, ya que se ilustran de forma sencilla las precisiones individuales de cada una de las categorías, los errores de inclusión (errores de comisión) y los errores de exclusión (errores de omisión) correspondientes al mapa generado. Un error de comisión ocurre cuando un área es incluida dentro de una categoría a la que no pertenece. Un error de omisión existe cuando se excluye un área de la categoría a la que pertenece (Congalton & Green, 2009).

En el ejemplo de la Figura 4.9 se muestra la matriz de confusión para 4 categorías que se pueden observar en una zona agrícola. La matriz indica, por ejemplo, que seis áreas de sorgo se clasificaron como áreas de maíz, por

lo que se tiene un error de omisión para la categoría sorgo, pero un error de comisión para la categoría maíz. Además de facilitar la comprensión de esos errores también se pueden calcular la precisión global, la precisión del productor y la precisión de usuario. La que más se utiliza es la precisión global, ésta se obtiene sumando las áreas de la diagonal (las cuales representan las áreas clasificadas correctamente) y dividiendo el total de la suma entre el número de áreas que se utilizaron para la verificación (Congalton & Green, 2009).

		Datos de referencia				Fila
		M	S	Co	Plas	Total
Datos de la clasificación	M	338	6	0	0	344
	S	38	406	0	0	444
	Co	36	0	278	0	314
	Plas	0	0	0	242	242
Columna	Total	412	412	278	242	1344

Categorías
M= Maíz
S= Sorgo
Co= Cosechado
Plas=Plástico

Precisión global=
 $(338+406+278+242)/1344=1264/1344=94.05\%$

Precisión del productor	Precisión de usuario
M=338/412=82.04%	M=338/344=98.26%
S=406/412=98.54%	S=406/444=91.44%
Co=278/278=100%	Co=278/314=88.54%%
Plas=242/242=100%	Plas=242/242=100%

Figura 4.9: Ejemplo de la matriz de confusión.

Para trabajar con casos más generales y realizar el análisis explicado anteriormente, en la imagen de la Figura 4.10 se presenta matemáticamente la matriz de error. n representa el número de muestras distribuidas en k^2 celdas, cada muestra pertenece a una de las k categorías o clases en el mapa (generalmente se ubican en las filas) e independientemente a una de las mismas k categorías en el conjunto de datos de referencia (generalmente se ubican

en las columnas). Se denotarán como n_{ij} al número de muestras clasificadas en la categoría i $\{i=1,2,\dots, k\}$ en el mapa y la categoría j $\{j=1,2,\dots, k\}$ en el conjunto de datos de referencia (Congalton & Green, 2009).

		j= Columnas (referencia)				Fila Total
		1	2	...	k	n_{i+}
i= filas (clasificación)	1	n_{11}	n_{12}	...	n_{1k}	n_{1+}
	2	n_{21}	n_{22}	...	n_{2k}	n_{2+}

	k	n_{k1}	n_{k2}	...	n_{kk}	n_{k+}
Columna Total	n_{+1}	n_{+2}	...	n_{+k}	n	
	n_{+j}					

Figura 4.10: representación matemática de la matriz de confusión.

El número de muestras clasificadas (mediante teledetección) se denotará como n_{i+} :

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^k n_{ij} \quad (4.1)$$

Mientras que el número de muestras clasificadas en la categoría j en el conjunto de datos de referencia o verificación se denotará como n_{+j} , Ecuación 4.2.

$$n_{+j} = \sum_{i=1}^k n_{ij} \quad (4.2)$$

La precisión global entre los datos de referencia y los obtenidos en la

clasificación supervisada se calcula de la siguiente forma:

$$\text{precisión global} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} \quad (4.3)$$

En la Ecuación 4.4 se muestra el cálculo de la precisión del productor y en la Ecuación 4.5 el cálculo para la precisión de usuario.

$$\text{precisión del productor } j = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad (4.4)$$

$$\text{precisión de usuario } i = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad (4.5)$$

Kappa

Además de calcular los parámetros mencionados anteriormente también es necesario realizar el análisis Kappa, con ese análisis se obtiene el estadístico \hat{K} , otra medida de precisión, que se basa en la diferencia entre la concordancia real de la matriz de error (o sea, entre la clasificación obtenida mediante teledetección y los datos de referencia ubicados en la diagonal principal de la matriz) y la coincidencia entre los errores de omisión y comisión (Congalton & Green, 2009).

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}} \quad (4.6)$$

Kappa sirve para medir qué tanto coincide la clasificación supervisada con los datos de referencia. Si el estadístico \hat{K} es significativamente mayor que 0 se puede concluir que la clasificación realizada es mejor que una clasificación aleatoria (Congalton & Green, 2009).

Los intervalos de confianza respecto a \hat{K} se pueden calcular mediante la Ecuación 4.7 (Congalton & Green, 2009).

$$\hat{\text{vâr}}(\hat{K}) = \frac{1}{n} \left\{ \frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right\} \quad (4.7)$$

Donde:

$$\theta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_{ii},$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{i+n_i},$$

$$\theta_3 = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{ii}(n_{i+n_i})$$

y

$$\theta_4 = \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij}(n_{j+n_i})^2.$$

Intervalos de confianza

Para calcular los intervalos de confianza de la matriz de error se utilizó el método explicado en Congalton & Green (2009) y Card (1982). A continuación se muestran los cálculos para los intervalos de confianza de la matriz de la Figura 4.9.

Primero se calculan las proporciones marginales del mapa, π_j , las cuales se obtienen dividiendo el área que ocupa cada categoría entre el área total del mapa, en la imagen de la Figura 4.11 se presentan las mismas.

		Datos de referencia				Fila Total	Proporciones marginales del mapa, π_j
		M	S	Co	Plas		
Datos de la clasificación	M	338	6	0	0	344	0.5
	S	38	406	0	0	444	0.3
	Co	36	0	278	0	314	0.1
	Plas	0	0	0	242	242	0.1
Columna Total	412	412	278	242	1344		Precisión global= $(338+406+278+242)/1344=$ $1264/1344=94.05\%$

Figura 4.11: Proporciones marginales del mapa.

A continuación se calculan las probabilidades individuales en cada celda, \hat{p}_{ij} , mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{p}_{ij} = \pi_j \frac{n_{ij}}{n_{i+}}$$

En la matriz de la Figura 4.12, se muestra la matriz de error que resulta al hacer el cálculo anterior.

		Datos de referencia				Fila Total	Proporciones marginales del mapa, π_j
		M	S	Co	Plas		
Datos de la clasificación	M	0.491	0.009	0.000	0.000	0.5	0.5
	S	0.026	0.274	0.000	0.000	0.3	0.3
	Co	0.011	0.000	0.089	0.000	0.1	0.1
	Plas	0.000	0.000	0.000	0.100	0.1	0.1
Columna Total		0.528	0.283	0.089	0.100		

Figura 4.12: Matriz de error de las probabilidades individuales de cada celda.

Posteriormente, se calculan las proporciones marginales verdaderas, \hat{p}_j , mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{p}_j = \sum_{i=1}^r \pi_j \frac{n_{ij}}{n_{.j}}$$

En este caso, $\hat{p}_1 = 0.491 + 0.026 + 0.011 + 0.0000 = 0.528$, $\hat{p}_2 = 0.283$, $\hat{p}_3 = 0.089$ y $\hat{p}_4 = 0.100$.

Con la siguiente ecuación se calcula la precisión del productor, $\hat{\theta}_{ii}$:

$$\hat{\theta}_{ii} = \frac{\pi_i n_{ii}}{\hat{p}_i n_{.i}} \text{ o } \frac{\hat{p}_{ii}}{\hat{p}_i}$$

Entonces queda: $\hat{\theta}_{11} = 0.491/0.528 = 0.930$, o 93%; $\hat{\theta}_{22} = 0.274/0.283 = 0.97$, o 97%; $\hat{\theta}_{33} = 0.089/0.089 = 1$, o 100%; y $\hat{\theta}_{44} = 0.100/0.100 = 1$ o 100%.

Para el cálculo de la precisión de usuario, $\hat{\lambda}_{jj}$ se utiliza la siguiente ecuación:

$$\hat{\lambda}_{jj} = \frac{\hat{n}_{jj}}{\hat{n}_{.j}}$$

Con lo cual se obtiene: $\hat{\lambda}_{11} = 338/344 = 0.983$, o 98 %; $\hat{\lambda}_{22} = 0.914$, o 91 %; $\hat{\lambda}_{33} = 0.885$, o 89 %; y $\hat{\lambda}_{44} = 1$, o 100 %.

A continuación, se calcula la probabilidad total correcta, \hat{P}_c sumando las probabilidades de la diagonal principal, como indica la siguiente ecuación:

$$\hat{P}_c = \sum_{j=1}^r \pi_j \frac{n_{jj}}{n_{.j}}$$

Por ejemplo, $\hat{P}_c = 0.491 + 0.274 + 0.089 + 0.100 = 0.954$ o, 95 %. El siguiente paso consiste en calcular las varianzas para la precisión global, la precisión del productor y la precisión de usuario, y de esta manera se obtienen los intervalos de confianza.

Para la varianza de la precisión global, \hat{P}_c , se utiliza la siguiente ecuación:

$$V(\hat{P}_c) = \sum_{i=1}^r p_{ii} \frac{(\pi_i - p_{ii})}{(\pi_i n)}$$

En este ejemplo $V(\hat{P}_c) =$

$$\begin{aligned} & 0.491 \frac{(0.5 - 0.491)}{(0.5 * 1344)} + 0.274 \frac{(0.3 - 0.274)}{(0.3 * 1344)} \\ & + 0.089 \frac{(0.1 - 0.089)}{(0.1 * 1344)} + 0.100 \frac{(0.1 - 0.100)}{(0.1 * 1344)} \\ & = 3.16 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

Por lo tanto el intervalo de confianza para \hat{P}_c es:

$$\begin{aligned} & \hat{P}_c \pm 2[V(\hat{P}_c)]^{1/2} = 0.954 \pm 0.011 \\ & = (0.943, 0.965) \text{ o } 94 \% \text{ a } 97 \% \end{aligned}$$

Para obtener la varianza de la precisión del productor, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V(\hat{\theta}_{ii}) = p_{ii} \hat{p}_i^{-4} \left[p_{ii} \sum_{j \neq 1}^r p_{ij} \frac{(\pi_j - p_{ij})}{\pi_j n} + (\pi_i - p_{ii}) \frac{(\hat{p}_i - p_{ii})^2}{\pi_i n} \right]$$

Por ejemplo para $\hat{\theta}_{11}$, quedaría de la siguiente forma:

$$\mathbf{V}(\hat{\theta}_{11}) = 0.491 * (0.528)^{-4} [0.491 \left\{ 0.026 \frac{(0.3 - 0.026)}{0.3 * 1344} + 0.011 \frac{(0.1 - 0.011)}{0.1 * 1344} + 0.000 \frac{(0.1 - 0)}{0.1 * 1344} \right\} + (0.5 - 0.491) \frac{(0.528 - 0.491)^2}{0.5 * 1344}]$$

Por lo tanto $V(\hat{\theta}_{11}) = 7.76 \times 10^{-5}$. Los intervalos de confianza para θ_{ii} se obtienen mediante:

$$\hat{\theta}_{ii} \pm 2[\mathbf{V}(\hat{\theta}_{ii})]^{1/2}$$

En el caso de $\hat{\theta}_{11}$ quedaría:

$$\begin{aligned} & 0.930 \pm 2[7.76 \times 10^{-5}]^{1/2} \\ & = 0.930 \pm 0.018 \\ & = (0.912, 0.948) \text{ o } 91 \% \text{ a } 95 \% \end{aligned}$$

Finalmente, para los intervalos de confianza de la precisión de usuario, la varianza se obtiene siguiendo la siguiente ecuación:

$$\mathbf{V}(\hat{\lambda}_{ii}) = p_{ii} \frac{(\pi_i - p_{ii})}{\pi_i^2 n}$$

y los intervalos de confianza para λ_{ii} quedan como $\hat{\lambda}_{ii} \pm 2[\mathbf{V}(\hat{\lambda}_{ii})]^{1/2}$. En el caso de λ_{11} se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}(\hat{\lambda}_{11}) &= 0.491 \frac{(0.5 - 0.491)}{(0.5)^2 1344} \\ &= 1.32 \times 10^{-5}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_{11} \pm 2[\mathbf{V}(\hat{\lambda}_{11})]^{1/2} &= 0.983 \pm 0.007 \\ &= (0.976, 0.99) \text{ o } 98 \% \text{ a } 99 \% \end{aligned}$$

4.3. Oferta espacial y temporal de residuos agrícolas

Con respecto a los residuos disponibles, se generó una capa con información del rendimiento de cada cultivo y la cantidad de generación de residuos de la siguiente manera:

1. Las capas generadas en cada clasificación se reclasificaron de la siguiente forma:

1. **Clasificación primavera-verano:** maíz, sorgo y otros.
2. **Clasificación otoño-invierno:** trigo y otros.

2. Se creó una capa con información de los perímetros ejidales dentro del límite municipal de Angamacutiro. La información se obtuvo de la base de datos del Registro Agrario Nacional (RAN).

3. De la base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), se obtuvieron los rendimientos de cada cultivo en el periodo de 2007 a 2016.

4. Posteriormente se unieron las capas de la clasificación con la de los perímetros ejidales.

5. En las capas creadas en el paso anterior se asignó el rendimiento promedio para cada cultivo, en cada clasificación. Multiplicando el área por el rendimiento se obtuvo el rendimiento total de cada área.

6. A lo anterior, se agregó el factor de producción de residuos para cada cultivo y se obtuvo así la capa de distribución de residuos.

7. Una vez obtenida la estimación total de residuos generados, se tomaron dos factores de recuperación de residuos que utilizan en Valdez-Vazquez *et al.* (2010); Lora & Andrade (2009):

1. 50%, para el mínimo de residuos disponibles para generación de energía eléctrica.
2. 70%, como máximo de residuos disponibles para generación de energía eléctrica.

De esta manera se obtuvo la cantidad de biomasa disponible para generar energía eléctrica.

4.4. Conversión de residuos a energía eléctrica

Finalmente se estimó la cantidad de energía eléctrica que se obtiene, a partir de cada residuo mediante combustión y gasificación.

Los dos procesos de obtención de energía mecánica que se presentaron en la Sección 2.2, parten de la energía potencial química del combustible, que se libera por combustión en forma de calor (Márquez, 2005), así que cuando se quiere estimar la cantidad de energía eléctrica a partir de residuos, primero hay que estimar la energía térmica y para eso es necesario saber el poder calorífico de los residuos. El poder calorífico hace referencia a la cantidad de calorías que se producen en la combustión de una unidad de masa ($PC[J/kg]$). Este depende de la cantidad de humedad del combustible, por lo que es elemental que la humedad de la biomasa sea menor al 30%. Para que se cumpla esa condición, generalmente la biomasa tiene que pasar previamente por un proceso de secado (Serrato Monroy & Cepeda, 2016).

El poder calorífico de la biomasa se mide en términos del poder calorífico inferior (PCI). El cual se define como la cantidad de calor que aporta el combustible por unidad de masa durante la combustión, en el proceso, el agua se libera en forma de vapor (Serrato Monroy & Cepeda, 2016; Márquez, 2005).

De esta forma, para obtener la energía térmica del combustible, la masa total de cada residuo, se multiplica por su respectivo poder calorífico, PC , como se indica en la Ecuación 4.8.

$$\text{Energía térmica} = PC[J/kg] * \text{Masa}[kg]_{\text{residual}} \quad (4.8)$$

La cantidad de energía eléctrica que se puede obtener con el calor obtenido en la combustión, depende del rendimiento o eficiencia de las tecnologías de transformación (el rendimiento global es el producto de dos rendimientos: el de combustión y el del ciclo, Márquez (2005)). Por lo tanto, hay que multiplicar la energía en forma de calor por el rendimiento (ν) de la máquina de transformación, como se indica en la Ecuación 4.9. La ecuación también toma en cuenta el factor de equivalencia de Joule (J) a kilovatio-hora(kWh).

$$\text{Energía eléctrica} = \text{Calor}[J] * \nu * \frac{kWh}{3600000J} \quad (4.9)$$

Capítulo 5

Resultados y discusión

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos de la investigación en campo, de la clasificación supervisada, el total de residuos agrícolas disponibles y la energía eléctrica final.

Los resultados de la clasificación se analizaron mediante la matriz de confusión, sobre la cual se realizó el análisis Kappa y se obtuvieron los intervalos de confianza para cada una de las clases.

5.1. Encuesta

En la primer vista se encontró que en Angamacutiro existe el departamento de Desarrollo Agropecuario, encargado entre otras cosas de la actividad agrícola, sin embargo, de acuerdo con su Director y con el Ing. Juan Pablo Pérez representante de SAGARPA, los datos de producción de maíz, sorgo y trigo del municipio, solo contienen información de la producción total anual de cada uno de los cereales., no hay información de la productividad de cada agricultor o parcela y los datos tampoco son espaciales.

Además de contestar las preguntas de la encuesta, los agricultores comentaron que el patrón de cultivo año con año no es el mismo para las tres especies, porque depende principalmente de la demanda de los productos y de la siniestralidad agrícola destacando las inundaciones y las plagas. Mencionaron, por ejemplo, que el maíz sería mejor pagado en ese ciclo, por lo que habría mayor producción del mismo. En el caso del sorgo, algunos mencionaron que debido a la plaga del piojo amarillo que vivieron en 2015, no se arriesgarían a sembrarlo en grandes cantidades.

En la Tabla 5.1 se encuentran el nombre y la edad de los encuestados, el ejido al que pertenecen, las hectáreas que cultivaron con maíz, el rendimiento que suelen obtener y el uso que le dan a los residuos. Veinte sembraron maíz y reportaron rendimientos desde 4.5 hasta 17.5 toneladas por hectárea siendo la media de 9.21 ton/ha.

Maíz					
Nombre	Edad	Ejido	Hectáreas cultivadas	Rendimiento (ton/ha)	Uso de los residuos
Joaquín Negrete Moreno	57	Agua Caliente	70	10	Alimento para ganado
Rodolfo García Cervantes	75	Agua Caliente	5	8	Alimento para ganado
Raúl Cervantes Méndez	55	Aramítaro de la Cal	6	7	Alimento para ganado
Albino Morado Tafolla	74	Aranjuez	0	0	Venta
Francisco Jiménez Suárez	52	Curícipo	10	5	Alimento para ganado
Domingo Estrada Bravo	53	El Guayabo	5	8	Alimento para ganado
Álvaro Lara Solís	65	El Maluco	3	12	Alimento para ganado
J. Antonio Chávez Martínez	66	El Maluco	12	9	Alimento para ganado
Rafael Jiménez Medina	62	El Troje	13	7	Alimento para ganado
Toribio Reyes Alonso	72	Gpe Norte	1	8	Alimento para ganado
Diego Banderas Bribiesca	32	Gpe Sur	5	10	Alimento para ganado
Juan Manuel García López	50	La Palma	0	0	Nada
José Luis Arellano Martínez	58	Miravalle	30	15	Alimento para ganado
Alfredo Blanquet García	70	Miravalle	6	5	Alimento para ganado
Eliseo Gutiérrez Zaragoza	61	Nuevo Paraiso	12	12	Alimento para ganado
J. Rafael Carranza Rivera	55	Rosario	0.5	8	Alimento para ganado
J. Trinidad Sánchez Rodríguez	73	San Diego	2	8	Alimento para ganado
José Chávez Vega	80	San Pedro	6.5	10	Quema
José Jiménez Cardona	55	Santiago Conguripo	65	12	Alimento para ganado
José Pesqueda García	60	Santiago Conguripo	10	9	Alimento para ganado
Roberto Álvarez Ortiz	43	Villa Unión	13	9	Alimento para ganado
Jorge Amando Lozada Jaramillo	63	Villa Unión	29	18	Alimento para ganado
Juan Orozo Toledo	56	San Ignacio	8	6	Alimento para ganado

Tabla 5.1: Resultados de la encuesta sobre cultivo de maíz.

En cuanto al sorgo se refiere, 15 de los encuestados lo sembraron y reportaron rendimientos desde 4.5 hasta 11 toneladas por hectárea (en promedio 7.7 ton/ha). La Tabla 5.2, contiene además las hectáreas que sembraron y los usos que le dan a los residuos.

Sorgo			
Nombre	Área sembrada (ha)	Rendimiento (ton/ha)	Uso de los residuos
Joaquín Negrete Moreno	10	8	Alimento para ganado
Raúl Cervantes Méndez	5	6	Alimento para ganado
Albino Morado Tafolla	7	5	Venta
Domingo Estrada Bravo	5	6	Alimento para ganado
J. Antonio Chávez Martínez	4	9	Alimento para ganado
Rafael Jiménez Medina	8	5	Alimento para ganado
Toribio Reyes Alonso	1	8	Alimento para ganado
Diego Banderas Bribiesca	4	8	Alimento para ganado
José Luis Arellano Martínez	40	10	Alimento para ganado
Eliseo Gutiérrez Zaragoza	4	10	Alimento para ganado
J. Trinidad Sánchez Rodríguez	1	8	Alimento para ganado
José Jiménez Cardona	50	9	Alimento para ganado
Roberto Alvares Ortiz	3	8	Alimento para ganado
Jorge Amando Lozada Jaramillo	40	11	Alimento para ganado
Juan Orozo Toledo	2	6	Alimento para ganado

Tabla 5.2: Resultados de la encuesta sobre cultivo de sorgo.

En el caso de los usos actuales de los residuos de maíz y sorgo, se observa que 22 de los encuestados lo designan para el ganado, ya sea que lo vendan, lo regalen o lo conserven. Su uso principal es como alimento pero también es utilizado como ornato en los establos. Dos agricultores mencionaron que lo queman.

Puesto que la encuesta se aplicó en el ciclo de primavera-verano, de los cultivos de trigo solo se obtuvo información del rendimiento y uso de los residuos, ya que los encuestados aún no sabían cuántas hectáreas sembrarían. En la Tabla 5.3 se encuentra dicha información. Solo trece sembrarían trigo ya que el resto pertenecen a ejidos de temporal, es decir ejidos que sólo cultivan en el ciclo de primavera-verano.

El patrón de uso de los residuos del trigo es diferente, 2 mencionaron que los designan para el ganado, el resto respondió que los dejan en la parcela y después los barbechan con la máquina o los queman. Sin embargo, el señor Luis Ríos Clemente de 80 años, encargado de la vigilancia del riego de las parcelas, aseguró que la mayoría de los residuos son quemados año con año para establecer el cultivo del ciclo de primavera-verano y el Lic. Diego Banderas Bribiesca agregó que los residuos son quemados porque son difíciles de utilizar, son residuos más duros y los animales no los consumen.

De acuerdo con los rendimientos reportados por los encuestados, en promedio se generan 6.1 ton de trigo por cada hectárea sembrada.

Trigo		
Nombre	Rendimiento (ton/ha)	Uso de los residuos
Joaquín Negrete Moreno	8	Barbecho o quema
Domingo Estrada Bravo	6	Barbecho
Álvaro Lara Solís	8	Barbecho
J. Antonio Chávez Martínez	7	Barbecho o quema
Diego Banderas Bribiesca	8	Barbecho o quema
Juan Manuel García López	7	Barbecho o quema
José Luis Arellano Martínez	4	Alimento para ganado
Alfredo Blanquet García	4	Barbecho
Eliseo Gutiérrez Zaragoza	5	Barbecho
José Chávez Vega	7	Quema
José Jiménez Cardona	5	Barbecho o quema
Roberto Álvares Ortiz	7	Quema
Jorge Amando Lozada Jaramillo	6	Pacas

Tabla 5.3: Resultados de la encuesta sobre cultivo de trigo.

5.2. Clasificación supervisada: Random Forest

A continuación se presentan los mapas que resultaron de la clasificación supervisada en cada ciclo así como las tablas que resultaron de las evaluaciones de las mismas.

5.2.1. Clasificación Random Forest primavera-verano

En la imagen de la figura 5.1 se muestra el resultado de la clasificación para el ciclo primavera-verano 2017. De acuerdo a la clasificación, se sembraron 9,235.5 ha de maíz y 2,050.41 ha de sorgo.

En el recuadro de la derecha, se puede apreciar que se obtiene un patrón más o menos rectangular, el común en las zonas agrícolas, en el caso de la clase Suelo los bordes son más marcados.

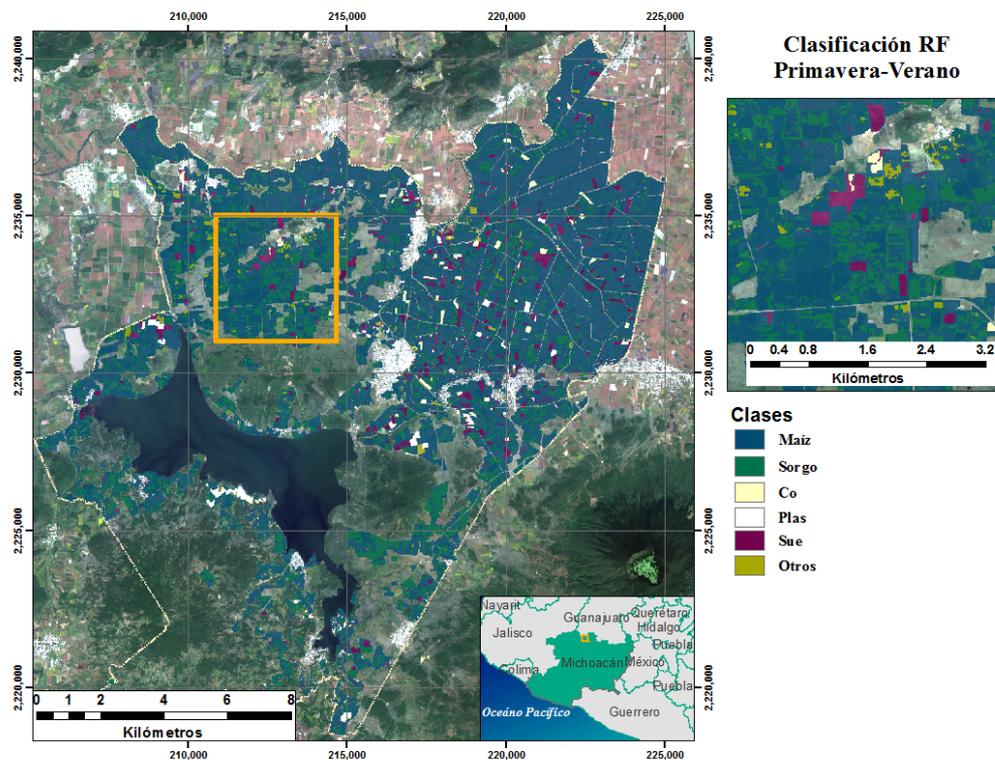


Figura 5.1: Clasificación supervisada de la superficie agrícola primavera-verano.

5.2.2. Evaluación de la clasificación primavera-verano

Con los polígonos de verificación se creó la matriz de confusión de la Tabla 5.4. La precisión global resultó de 84 % lo cual indica que de cada 100 píxeles en la imagen 84 han sido clasificados correctamente. El valor del estadístico kappa resultó de 0.76.

La columna de precisión de usuario, Tabla 5.4, muestra falsos positivos, es decir píxeles que sabemos que pertenecen a una clase y han sido clasificados dentro de otra. Por ejemplo en el caso de la clase Maíz muestra un 94 % de precisión, que resulta de haber clasificado 1651 píxeles como Maíz cuando en realidad solo 1546 lo son, más sin embargo, se le suman 98 píxeles que realmente son de Sorgo más 4 de Co y 3 de la clase Otros. La clase Maíz tiene píxeles extra que no debería tener de acuerdo a los datos de verificación.

La precisión del productor hace referencia a falsos negativos, es decir

píxeles que se le restan a la clase. Por ejemplo, nuevamente en Maíz, de 1981 píxeles de M1 sólo 1546 fueron clasificados como tal, el resto se perdió entre las clases Sorgo, Co y Otros. En este caso a la clase M1 le faltan píxeles según de acuerdo con los datos de referencia.

Datos de la clasificación									
Clase	Maíz	Sorgo	Co	Plas	Sue	Otros	Total	Precisión de usuario (%)	Error de comisión (%)
Maíz	1546	98	4	0	0	3	1651	94	6
Sorgo	397	512	0	0	0	7	916	56	44
Co	1	0	215	0	0	0	216	100	0
Plas	0	0	0	160	0	0	160	100	0
Sue	0	0	0	0	330	0	330	100	0
Otros	37	0	0	0	2	160	199	80	20
Total	1981	610	219	160	332	170	3472		
Precisión del productor (%)	78	84	98	100	99	94			
Error de omisión (%)	22	16	2	0	1	6			

Tabla 5.4: Matriz de confusión: clasificación primavera-verano.

Para calcular los intervalos de confianza, la Tabla 5.5 muestra las áreas que ocupan cada una de las clases en el mapa, el área total de la zona agrícola y sus respectivas proporciones marginales (área de la clase/ área del mapa).

Clase	Área (ha)	Proporciones marginales (π_i)
Maíz	9236	0.7637
Sorgo	1937	0.1601
Sorgo cosechado	114	0.0094
Plástico	112	0.0093
Suelo	571	0.0472
Otros	124	0.0103
Total	12094	

Tabla 5.5: Proporciones marginales de las clases de primavera-verano.

La Tabla 5.6, presenta las verdaderas proporciones marginales (\hat{p}_i), las precisiones del productor ($\hat{\theta}_{ii}$), las precisiones de usuario ($\hat{\lambda}_{jj}$) y sus intervalos de confianza. La probabilidad total correcta, $P_c = 0.8787$, se encuentra en el intervalo de confianza (0.8777, 0.8798).

Intervalos de confianza

Categoría verdadera	\hat{p}_i	Intervalo	$\hat{\theta}_{ii}$	Intervalo	$\hat{\lambda}_{jj}$	Intervalo
Maíz	0.7856	(0.7854, 0.7875)	0.9093	(0.9086, 0.9099)	0.9364	(0.9352, 0.9376)
Sorgo	0.1347	(0.1338, 0.1359)	0.6638	(0.6593, 0.6684)	0.5590	(0.5557, 0.5622)
Sorgo cosechado	0.0112	(0.0110, 0.0114)	0.8349	(0.8211, 0.8486)	0.9954	(0.9944, 0.9963)
Plástico	0.0093	(0.0093, 0.0093)	1.0000	—	1.0000	—
Suelo	0.0484	(0.0473, 0.0474)	0.9978	(0.9975, 0.9981)	1.0000	—
Otros	0.0109	(0.0107, 0.0111)	0.7598	(0.7485, 0.7710)	0.8040	(0.7984, 0.8096)

Tabla 5.6: Intervalos de confianza para las clases de primavera-verano.

Por lo tanto, tomando en cuenta las verdaderas proporciones marginales de cada clase, realmente se sembraron de 9,498.36 a 9,523.95 ha de maíz y de 1751.53 a 1780.96 ha de sorgo.

5.2.3. Clasificación Random Forest otoño-invierno

En la imagen de la figura 5.1 se presenta el resultado de la clasificación para el ciclo otoño-invierno 2017-2018. De acuerdo a la clasificación, se sembraron 3,039.58 ha de trigo, 568.28 ha de avena, 456.15 ha de fresa y frijol, y 1454.4 ha de alfalfa, garbanzo, pasto forrajero y maleza.

Como se observa en el mapa, sólo la zona de agricultura de riego (parte superior derecha y norte del municipio), está cultivada y en su mayoría con trigo.

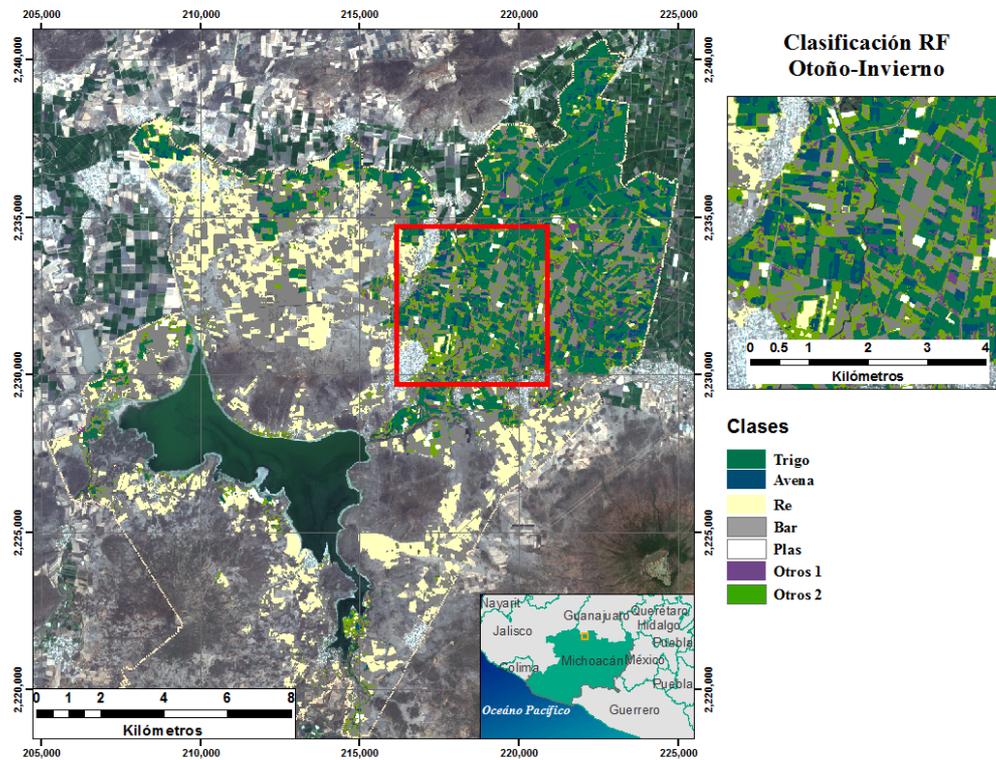


Figura 5.2: Clasificación supervisada de la superficie agrícola otoño-invierno.

5.2.4. Evaluación de la clasificación otoño-invierno

La matriz de confusión de la Tabla 5.7, indica que a la clase de trigo se le sumaron un 9% de píxeles de otras clases pero, perdió 9% de píxeles con base en los datos de referencia, realmente presenta un porcentaje alto tanto en la precisión del productor como en la de usuario. La precisión global de la clasificación es de 83% y kappa es igual a 0.77.

Datos de la clasificación

Clase	Trigo	Avena	Re	Bar	Plas	Otros 1	Otros 2	Total	Precisión de usuario (%)	Error de comisión (%)
Trigo	884	71	0	0	4	0	21	976	91	9
Avena	52	225	0	0	0	1	2	280	80	20
Re	0	0	149	27	0	0	0	176	85	15
Bar	0	0	4	742	0	2	2	750	99	1
Plas	0	0	0	0	54	0	0	54	100	0
Otros1	16	2	0	6	0	49	42	115	43	57
Otros2	15	42	70	53	0	9	56	245	23	77
Total	967	340	223	828	54	61	123	2596		
Precisión del productor (%)	91	66	67	90	100	80	46			
Error de omisión (%)	9	34	33	10	0	20	54			

Tabla 5.7: Matriz de confusión: clasificación otoño-invierno.

Las proporciones marginales de la clasificación otoño-invierno, se pueden ver en la Tabla 5.8, además de las respectivas áreas que ocupa cada clase en el mapa.

Clase	Área (ha)	Proporciones marginales (π_i)
Trigo	3,040	0.2513
Avena	715	0.0591
Residuos	2,766	0.2287
Barbechado	3,532	0.2920
Plástico	133	0.0110
Otros 1	456	0.0377
Otros 2	1454	0.1202
Total	12,096	

Tabla 5.8: Proporciones marginales de las clases de otoño-invierno.

Las verdaderas proporciones marginales (\hat{p}_i), las probabilidades correctas dadas las clases verdaderas ($\hat{\theta}_{ii}$), las probabilidades correctas dadas las clases del mapa ($\hat{\lambda}_{jj}$) y sus intervalos de confianza, se incluyen en la Tabla 5.9. La probabilidad total correcta, $P_c = 0.8121$, se encuentra en el intervalo de confianza (0.8107, 0.8135).

Intervalos de confianza

Categoría verdadera	\hat{p}_i	Intervalo	$\hat{\theta}_{ii}$	Intervalo	$\hat{\lambda}_{jj}$	Intervalo
Trigo	0.2512	(0.2505, 0.2519)	0.9061	(0.9042, 0.9080)	0.9057	(0.9039, 0.9076)
Avena	0.0871	(0.0863, 0.0878)	0.5458	(0.5410, 0.5505)	0.8036	(0.7988, 0.8083)
Residuos	0.2295	(0.2281, 0.2310)	0.8435	(0.8408, 0.8463)	0.8466	(0.8412, 0.8520)
Barbechado	0.3519	(0.3505, 0.3533)	0.8208	(0.8207, 0.8209)	0.9893	(0.9886, 0.9901)
Plástico	0.0110	(0.0110, 0.0110)	1	—	1	—
Otros 1	0.0215	(0.0210, 0.0219)	0.7482	(0.7372, 0.7593)	0.4261	(0.4169, 0.4353)
Otros 2	0.0479	(0.0471, 0.0486)	0.5742	(0.5665, 0.5819)	0.2286	(0.2245, 0.2326)

Tabla 5.9: Intervalos de confianza para las clases de otoño-invierno.

Para este caso, de acuerdo a las verdaderas proporciones marginales del mapa, se sembraron 3,038 ha de trigo, con un intervalo de confianza de (3,030, 3,047).

5.3. Oferta espacial y temporal de residuos agrícolas

En esta sección se presentan la estimación y el resultado de los residuos agrícolas disponibles de cada cultivo para su transformación.

5.3.1. Rendimiento de los cultivos

Puesto que la generación de residuos de un cultivo depende de su rendimiento, y el rendimiento a su vez depende del área geográfica en la que se encuentra, se creó la capa de la Figura 5.3, donde se indica la distribución de los ejidos en el municipio. De acuerdo con el RAN, existen 41 ejidos dentro del límite municipal de Angamacutiro, de los cuales 22 pertenecen al municipio, 2 al municipio José Sixto Verduzco, 7 al municipio de Panindícuaro, 2 al municipio de Penjamillo, 7 son del municipio de Pénjamo, Gto., y uno más del municipio de Puruándiro. En la Tabla 5.10 se encuentran los nombres de todos los ejidos.

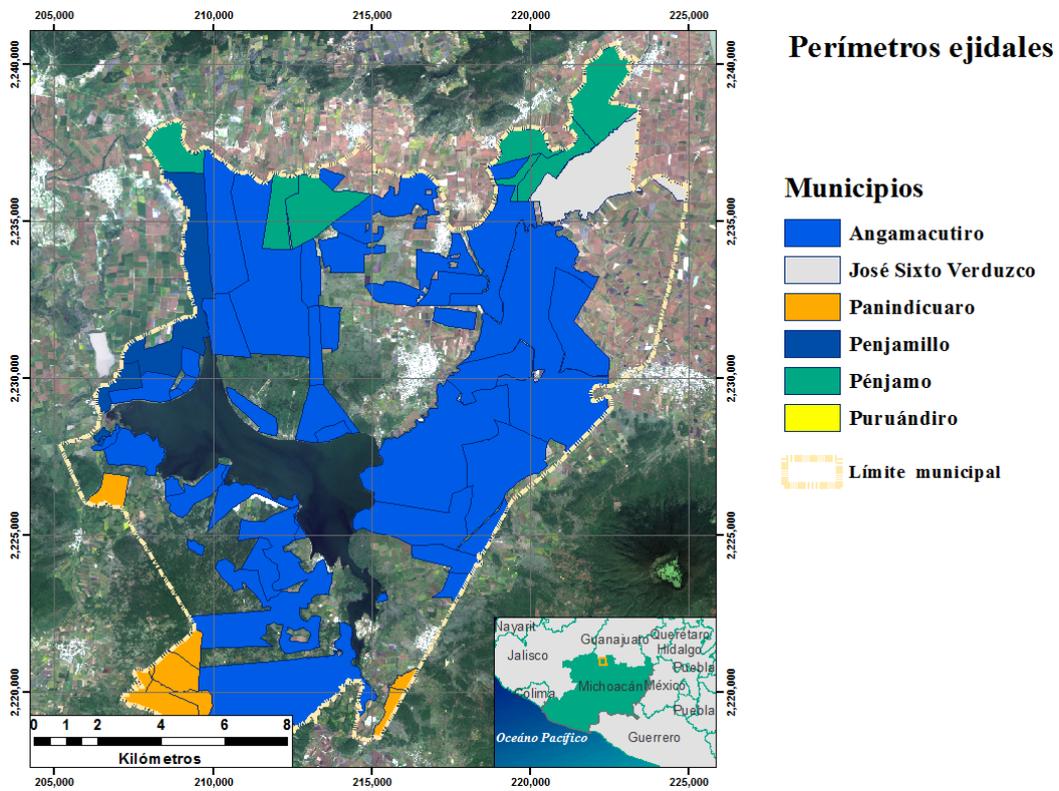


Figura 5.3: Perímetros ejidales dentro del límite municipal de Angamacutiro.

Ejid			
Angamacutiro		José Sixto Verduzco	
Agua Caliente	Guadalupe Sur	El Zapote de Parras	San Martín
Aramítaro de la Cal	El Guayabo Buenavista		
Aranjuez	La Canoa		
Curícipo	La Palma		
El Maluco	Miravalle		
El Paraíso	San Diego Buenavista		
El Refugio	San Ignacio		
El Rosario	San Pedro		
El Troje	Santa María		
Estancia del Río	Santiago Conguripo		
Guadalupe Norte	Villa Unión		
Panindícuaro	Penjamillo	Pénjamo	Puruándiro
Curimeo	Ansihuácuaro	Agua Caliente	Casas Viejas
Hacienda de Curimeo	San Isidro	El Marmol	
J. Trinidad Regalado		Potrerrillos	
Los Alvarados		Potreros	
Los Ranchos de Epejan		Puerta de Agua Caliente	
Ojo de Agua de Señora		Rancho Nuevo de Potreros	
San Miguel Epejan		San Vicente del Marmol	

Tabla 5.10: Ejidos dentro del límite municipal.

Cada una de las capas generadas en las Subsecciones 5.2.1 y 5.2.3, se unieron con la de ejidos para asignar el promedio del rendimiento de los cultivos de maíz, sorgo y trigo, con base al municipio al que pertenecen. Los rendimientos se tomaron de las bases de datos del SIACON NG en el periodo de 2007 a 2016 y se pueden consultar en la Tabla 5.11.

Rendimiento promedio (ton/ha) 2007-2016						
Municipio \ Cultivo	Angamacutiro	José Sixto Verduzco	Panindícuaro	Penjamillo	Pénjamo	Puruándiro
Maíz	6.88	7.26	4.28	5.55	6.23	6.32
Sorgo	6.05	6.03	5.23	4.98	6.09	5.91
Trigo	5.00	4.72	2.87	4.57	5.95	5.09

Tabla 5.11: Rendimiento promedio de los cultivos: maíz, sorgo y trigo.

Cabe mencionar que los rendimientos de la Tabla 5.11, están por debajo de los rendimientos promedio obtenidos en la encuesta, sin embargo, se tomaron los de SIACON NG por que la cantidad de encuestados no es una muestra representativa, pero valdría la pena aumentar la cantidad de encuestados para corroborar la información de SIACON NG.

La imagen de la Figura 5.4 presenta la distribución de la biomasa generada en el ciclo de primavera-verano 2017. Las áreas rojas, naranjas o amarillas

representan aquellas zonas donde hay más biomasa. Aproximadamente resultaron 60,390.75 ton de maíz con un intervalo de confianza de (60,253.65, 60,534.80). Para el sorgo resultaron aproximadamente 13,816.66 ton, en el intervalo (13,759.05, 13,866.89) ton.

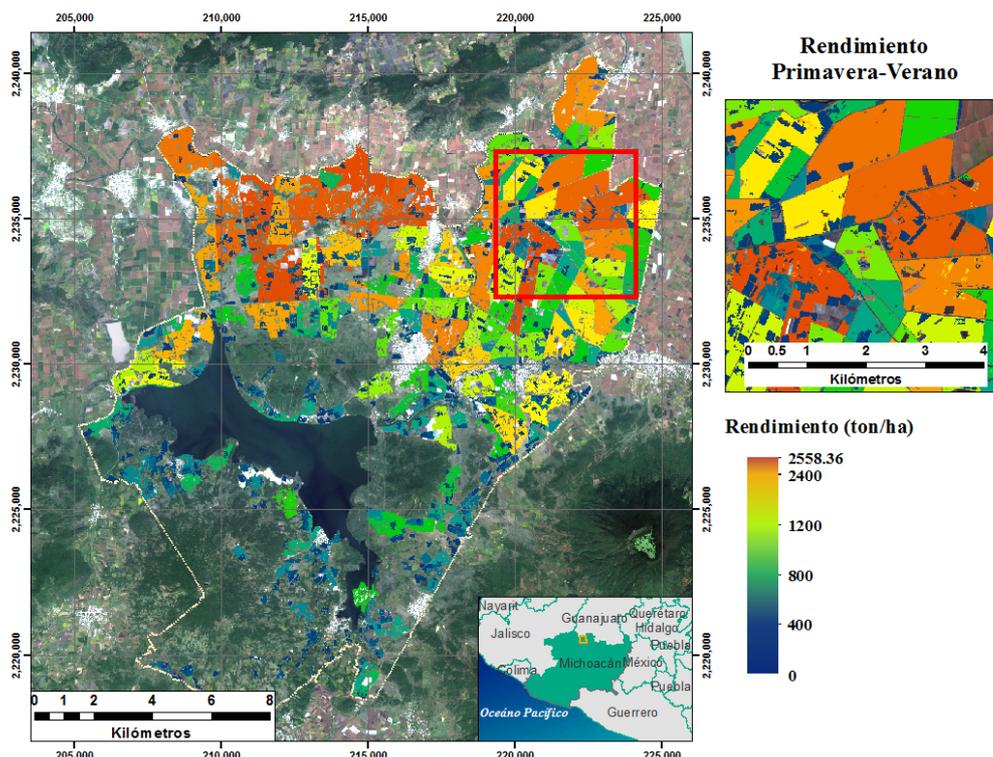


Figura 5.4: Distribución del toneladas generadas en primavera-verano

La imagen de la Figura 5.5 presenta la distribución de la biomasa generada durante el ciclo otoño-invierno 2017-2018. La distribución del trigo es casi uniforme en la zona de riego del valle de Angamacutiro, y en el área de temporal aparecen pocas zonas dispersas. Aproximadamente resultaron 18,423.01 ton de trigo, con un intervalo de confianza de (18,404.59, 18,441.43) ton.

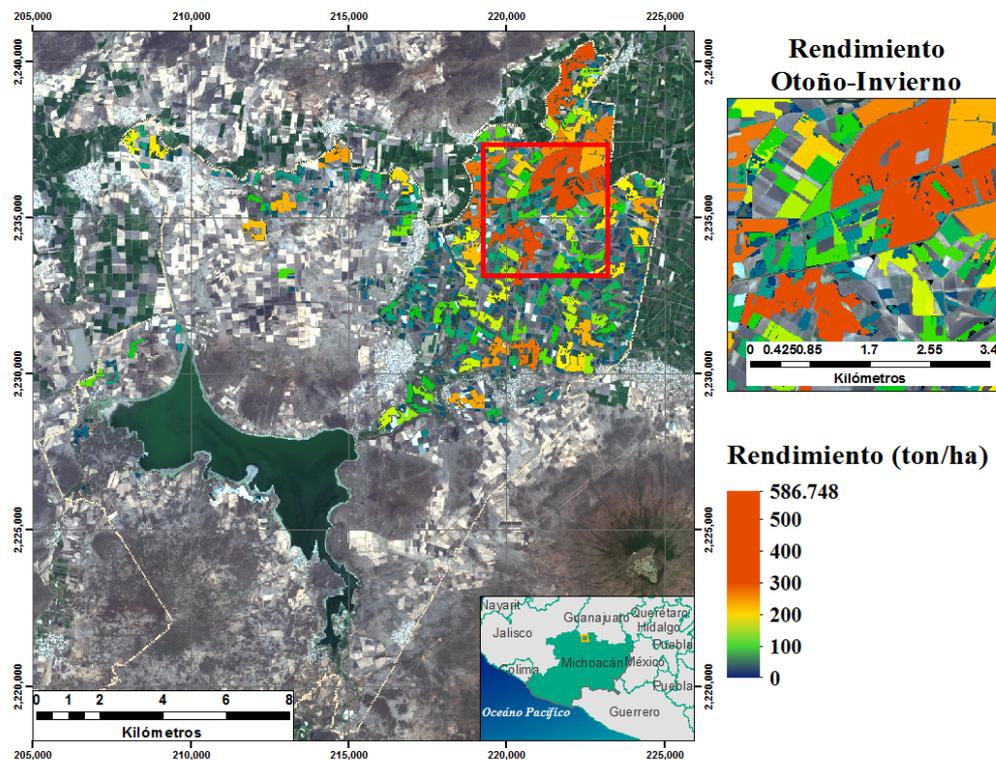


Figura 5.5: Distribución del toneladas generadas en otoño-invierno

5.3.2. Residuos disponibles

Para estimar la cantidad de residuos disponibles de cada cultivo, primero se multiplicaron las toneladas, obtenidas en la sección anterior, por los factores de generación de residuos de la Tabla 2.1 (se tomaron los de SAGARPA (2015) y Valdez-Vazquez *et al.* (2010), por ser factores para cultivos de México). Para los tres cultivos se eligieron dos factores, en el caso del maíz, 0.55 y 2.0; para el sorgo 0.47 y 1.75; y para el trigo 1.2 y 1.5, ver las Tablas 5.12, 5.13 y 5.14.

En segundo lugar los residuos generados se multiplicaron por dos factores de recuperación de residuos (50% y 70%), obteniendo así un mínimo y un máximo de residuos disponibles para la generación de electricidad (Tablas 5.12, 5.13 y 5.14).

De tal forma que se obtendrían desde 17, 673.64 hasta 90, 095.94 toneladas de residuos de maíz para su transformación a energía eléctrica, o como míni-

mo entre 62,315 y 62,537 toneladas y como máximo entre 174,325 y 175,035 toneladas anualmente, sumando los residuos de los tres cultivos.

	Factor 0.55	Intervalo	Factor 2.0	Intervalo
	35,347.27 ton	(35,299.71, 35,394.83)	128,535.54 ton	(128,362.59, 128,708.48)
Factor de recuperación 50 %	17,673.64 ton	(17,649.86, 17,697.42)	64,267.77 ton	(64,181.30, 64,354.24)
Factor de recuperación 70 %	24,743.09 ton	(24,709.80, 24,776.38)	89,974.87 ton	(89,835.81, 90,095.94)

Tabla 5.12: Residuos de maíz disponibles.

	Factor 0.47	Intervalo	Factor 1.75	Intervalo
	4,971.34 ton	(4,929.88, 5,012.80)	18,510.32 ton	(18,355.95, 18,664.69)
Factor de recuperación 50 %	2,485.67 ton	(2,464.94, 2,506.40)	9,255.16 ton	(9,177.97, 9,332.35)
Factor de recuperación 70 %	3,479.94 ton	(3,450.92, 3,508.96)	12,957.22 ton	(12,849.16, 13,065.28)

Tabla 5.13: Residuos de sorgo disponibles.

	Factor 1.2	Intervalo	Factor 1.5	Intervalo
	22,107.61 ton	(22,085.51, 22,129.72)	27,634.52 ton	(27,606.88, 27,662.15)
Factor de recuperación 50 %	9,333.43 ton	(9,307.38, 9,359.47)	11,666.78 ton	(11,634.22, 11,699.34)
Factor de recuperación 70 %	13,066.80 ton	(13,030.33, 13,103.26)	16,333.49 ton	(16,287.91, 16,379.08)

Tabla 5.14: Residuos de trigo disponibles.

En el trabajo de Valdez-Vazquez *et al.* (2010) se estimó que Angamacu-tiro podría generar de 5,600 a 28,000 ton de residuos de maíz y de 140 a 5,600 ton de residuos de sorgo y de trigo anualmente, de los doce resultados estimados en esta tesis, tres entran en dichos rangos, sin embargo, ellos obtuvieron sus resultados con un factor de generación de residuos de 1.5 que supera a los que se utilizaron en esta tesis para los cultivos del maíz y del sorgo, utilizando el factor de 1.5 todas las estimaciones de residuos de maíz y sorgo en este trabajo discreparían totalmente con las de Valdez-Vazquez *et al.* (2010). Por otra parte, en el caso de los residuos del trigo ninguno de los cuatro resultados de la Tabla 5.14 entran en el rango de Valdez-Vazquez *et al.* (2010). Las diferencias entre las estimaciones podrían deberse a la utilización de diferentes rendimientos y/o superficie de cada uno de los cultivos, cantidades que en Valdez-Vazquez *et al.* (2010) solo se presentan a nivel nacional.

5.4. Energía eléctrica

Para la estimación de energía eléctrica, se utilizaron las Ecuaciones 4.8 y 4.9. Se eligieron los poderes caloríficos para residuos que indican en Rosillo-Calle (2007) (13, 13 y 13.9 MJ; para maíz, sorgo y trigo, respectivamente), se tomaron en cuenta los diferentes casos de residuos disponibles de la sección anterior y los rendimientos de las tecnologías de conversión expuestas en el marco teórico.

5.4.1. Combustión

Para el proceso de la combustión se eligieron los rendimientos $\nu = 38\%$ y $\nu = 40\%$ (Serrato Monroy & Cepeda, 2016). Las Tablas 5.15, 5.16 y 5.17, incluyen las estimaciones de energía eléctrica generada a partir de los tres tipos de residuos. La primer fila indica los factores de generación de residuos, F_g , y la primer columna los factores de recuperación de residuos, F_r .

Para cada uno de los tres residuos se presentan 8 posibles resultados. Por ejemplo, viendo la Tabla 5.15, con $\nu = 15\%$, $F_r = 50\%$ y $F_g = 0.55$, se estimaron como mínimo 9,573.22 MWh en un intervalo de confianza de (9,560.34, 9,586.10) MWh. Y como máximo con $\nu = 38\%$, $F_r = 70\%$ y $F_g = 2.0$, se estimaron 123,465.52 MWh en un intervalo de (123,299.40, 123,631.65) MWh.

Energía eléctrica (MWh)				
Residuos de maíz				
Combustión, $\nu = 15\%$				
$F_r \backslash F_g$	0.55	intervalo	2.0	intervalo
50%	9,573.22	(9,560.34, 9,586.10)	34,811.71	(34,764.87, 34,858.55)
70%	13,402.51	(13,384.47, 13,420.54)	48,736.39	(48,670.82, 48,801.97)
Combustión, $\nu = 38\%$				
$F_r \backslash F_g$	0.55	intervalo	2.0	intervalo
50%	24,252.16	(24,219.53, 24,284.79)	88,189.66	(88,071.00, 88,308.32)
70%	33,953.02	(33,907.34, 33,998.70)	123,465.52	(123,299.40, 123,631.65)

Tabla 5.15: Energía eléctrica a partir de residuos de maíz.

Energía eléctrica (MWh)				
Residuos de sorgo				
Combustión, $\nu = 15\%$				
$F_r \backslash F_g$	0.47	intervalo	1.75	intervalo
50%	1,346.41	(1,335.18, 1,357.63)	5,013.21	(4,971.40, 5,055.02)
1,884.97	(1,869.25, 1,900.69)	7,018.50	(6,959.96, 7,077.03)	
Combustión, $\nu = 38\%$				
$F_r \backslash F_g$	0.47	intervalo	1.75	intervalo
50%	3,410.89	(3,382.45, 3,439.34)	12,700.14	(12,594.22, 12,806.05)
4,775.25	(4,735.43, 4,815.08)	17,780.19	(17,631.91, 17,928.47)	

Tabla 5.16: Energía eléctrica a partir de residuos de sorgo.

Energía eléctrica (MWh)				
Residuos de trigo				
Combustión, $\nu = 15\%$				
$F_r \backslash F_g$	1.2	intervalo	1.5	intervalo
50%	6,402.00	(6,395.59, 6,408.40)	8,002.50	(7,994.49, 8,010.50)
70%	8,962.80	(8,953.83, 8,971.76)	11,203.49	(11,192.29, 11,214.70)
Combustión, $\nu = 38\%$				
$F_r \backslash F_g$	1.2	intervalo	1.5	intervalo
50%	16,218.39	(16,202.17, 16,234.61)	20,272.99	(20,252.72, 20,293.26)
70%	22,705.75	(22,683.04, 22,728.45)	28,382.19	(28,353.80, 28,410.57)

Tabla 5.17: Energía eléctrica a partir de residuos de trigo.

Sumando la energía eléctrica proporcionada por cada residuo, a partir de un sistema de combustión, se obtuvieron un mínimo y un máximo de energía eléctrica que se puede obtener al año, dependiendo de los rendimientos, ver Tabla 5.18.

Energía eléctrica (MWh)		
Combustión, $\nu = 15\%$		
Mínimo	16,325.23	(16,286.04, 16,364.43)
Máximo	65,214.70	(65,064.19, 65,365.21)
Combustión, $\nu = 38\%$		
Mínimo	41357.26	(41,257.96, 41,456.55)
Máximo	165,210.58	(164,829.29, 165,591.86)

Tabla 5.18: Energía eléctrica final mediante combustión.

En el caso de obtener el mínimo de energía de la Tabla 5.18, optando por un sistema de combustión de 1 MW de potencia, con un rendimiento del 15%, que trabaje un 80% de horas del año y además pedimos que éste sea autosustentable, se designarían 7,008 MWh para su funcionamiento, por lo que se podrían destinar, como mínimo, de 9,278.04 MWh al año para otros usos. Tomando en cuenta que el consumo de electricidad per cápita promedio en México es de 2.1 MWh al año, se podría dar abasto a 4,418 personas. Si se obtuviera el máximo de energía se podría cubrir la electricidad para las 15,193 personas de Angamacutiro y la energía para un sistema de 19 MW con un rendimiento de 38%, lo cual concuerda con los resultados de Valdez-Vazquez *et al.* (2010) (aquellos municipios que generan entre 28,000.1 y 2,181,021 toneladas por año podrían ser útiles para una planta de 1 a 78 MW), sin embargo faltaría evaluar qué sistema es mejor para el municipio.

5.4.2. Gasificación

Los resultados de la energía eléctrica generada mediante gasificación, se muestran en la Tabla 5.19, ésta, contiene los resultados para los tres tipos de residuos, con $\nu = 40\%$ (Rosillo-Calle, 2007), para cada tipo de residuo, se muestran 4 posibles casos.

El cálculo se hizo igual que con la combustión, lo único que cambia es el rendimiento, es preciso recordar que los rendimientos de las tecnologías de gasificación pueden ser mayores, por lo que las estimaciones podrían aumentar.

Energía eléctrica (MWh)				
Gasificación, $\nu = 40\%$				
Residuos de maíz				
$F_r \backslash F_g$	0.55	intervalo	2.0	intervalo
50 %	25,528.59	(25,494.24, 25,562.93)	92,831.22	(92,706.32, 92,956.12)
70 %	35,740.02	(35,691.93, 35,788.11)	129,963.71	(129,788.84, 130,138.57)
Residuos de sorgo				
$F_r \backslash F_g$	0.47	intervalo	1.75	intervalo
50 %	3,590.41	(3,560.47, 3,620.36)	13,368.56	(13,257.07, 13,480.06)
70 %	5,026.58	(4,984.66, 5,068.50)	18,715.99	(18,559.90, 18,872.08)
Residuos de trigo				
$F_r \backslash F_g$	1.2	intervalo	1.5	intervalo
50 %	14,414.96	(14,374.73, 14,455.18)	18,018.70	(17,968.41, 18,068.98)
70 %	20,180.94	(20,124.62, 20,237.26)	25,226.17	(25,155.78, 25,296.57)

Tabla 5.19: Energía eléctrica a partir de los residuos de los tres cultivos.

De igual forma que en el caso de la combustión, se suma la contribución de cada residuo, mediante gasificación se estimaron al menos de 43,533.96 MWh, ver Tabla 5.20. En el caso mínimo, si se quisiera dar abasto a la población de Angamacutiro (15,193 personas) y a la máquina de conversión, por un año, se necesitaría que la potencia de ésta fuera a lo más 1 MW. Con esto 7,008 MWh se destinarían para la máquina y el resto cubriría los 31,905.3 MWh para las personas.

Si se lograra obtener el máximo de energía de la Tabla 5.20, 174,307.23 MWh, una máquina con una potencia de 20 MW o 10 máquinas con una potencia de 2 MW, podrían autoabastecerse, y producir la energía eléctrica para suministrar a la población durante un año.

Energía eléctrica (MWh)		
Gasificación, $\nu = 40\%$		
Mínimo	43,533.96	(43,429.44, 43,638.48)
Máximo	173,905.87	(173,504.52, 174,307.23)

Tabla 5.20: Energía eléctrica final mediante gasificación.

Capítulo 6

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

Abordar el problema mediante teledetección facilitó el alcance de los objetivos propuestos, la utilización de imágenes Sentinel 2A en conjunto con el método Random Forest permitió estimar la cantidad de hectáreas sembradas con cada uno de los cultivos con precisiones mayores al 80 %, esto, además de lidiar con la falta de información de la producción agrícola en Angamacutiro, sirvió para estimar la cantidad de residuos, parte primordial de la tesis, ya que de la cantidad de residuos dependió la cantidad de energía eléctrica.

En lo que respecta a los supuestos de trabajo, se encontró que en Angamacutiro se generan como mínimo entre 62,315 y 62,537 toneladas de residuos de maíz, sorgo y trigo; y como máximo entre 174,325 y 175,035 toneladas anualmente. Con esa cantidad de residuos, en el peor de los casos se podría dar abasto, durante el año, a un sistema de combustión de 1 MW y beneficiar al 29 % de la población en Angamacutiro; o en el mejor de los casos, mediante gasificación, dar abasto a un sistema de 1 a 20 MW y a la población del municipio.

Si bien se necesita más para una toma de decisiones, los resultados obtenidos demuestran que la cantidad de residuos que se genera a nivel municipal es suficiente para ser aprovechada como insumo para la generación de energía eléctrica.

6.1. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se buscará establecer un criterio para determinar la viabilidad de la instalación de una o más plantas de transformación en Angamacutiro. Para cual sería necesario:

- 1) Analizar la oferta y demanda de energía eléctrica en el municipio.
- 2) Analizar el costo-beneficio, que incluye desde la obtención y transporte de los residuos hasta la generación de energía eléctrica.
- 3) Un análisis de emisiones de GEI que incluya desde el transporte hasta la transformación de la biomasa.

Apéndice A

Encuesta

Nombre:

Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)
------------------	------------------	-----------

Edad: _____

TOTAL DE TERRENOS

Cantidad

1 Entre enero y septiembre de este año, en este municipio,
¿Cuántos terrenos manejó en total?..... _____

TERRENO No. 1

SUPERFICIE DEL TERRENO

Hectáreas

2 Este terreno, ¿cuánta superficie tiene en
total?..... _____

TENENCIA

3 Este terreno es:

.1 ¿Ejidal?

.1.1 Nombre del ejido _____

.2 ¿Comunal?

.2.1 Nombre de la comunidad agraria _____

.3 ¿De propiedad privada?

.4 ¿De colonia?

.5 ¿Federal o público (municipal, estatal o nacional)?

DERECHOS SOBRE LA TIERRA

4 Este terreno:

.1 ¿Es propiedad del productor?

.2 ¿Está rentado?

.3 ¿Está tomado a medias o en aparcería?

.4 ¿Es prestado?

.5 ¿Está en concesión?

.6 ¿Lo tiene en otra forma?

.6.1 especifique _____

ACTIVIDAD DEL TERRENO

5 Entre octubre del año pasado y septiembre de este año, ¿cuál fue la actividad a la que se dedicó este terreno?

.1 AGRICULTURA

.1.1 Principal cultivo que se siembra regularmente: _____

.1.2 ¿En qué porcentaje su terreno es:

A. De riego? _____%

B. De temporal? _____%

.2 GANADERÍA

.2.1 ¿Cuál es la principal especie animal que cría? _____

.3 AMBAS

.3.1 ¿Cuál es la principal: agricultura? ganadería?
pase a 3.2

.3.1.1 principal cultivo que se siembra regularmente: _____

.3.1.3 ¿En qué porcentaje su terreno es:

A. de riego?..... _____%

B. de temporal? _____%

.3.1.4 ¿Cómo se conoce al lugar donde se ubica el terreno? _____

.3.2 ¿Cuál es la principal especie animal que cría? _____

.4 otra

.4.1 ¿cuál? _____

AGRICULTURA

7 Entre octubre del año pasado y septiembre de este año sembró alguno de los siguientes cultivos:

Nombre del cultivo	¿Cuándo los sembró?		¿Cuántas hectáreas sembró o tiene plantadas?	¿Cuántas hectáreas son de riego?	¿Cuántas hectáreas cosechó o están en producción?	¿Cuántas toneladas obtuvo o cosechó?
	Mes	Año				
Maíz						
Trigo						
Sorgo						

CULTIVOS INTERCALADOS

8 De estos cultivos, ¿sembró algunos mezclados, asociados o intercalados?Sí
 no

.1 ¿Qué cultivos son?

<i>Nombre</i>		<i>Nombre</i>		<i>Nombre</i>	<i>Mes/Año</i>
_____	con	_____	con	_____	___/___
_____	con	_____	con	_____	___/___
_____	con	_____	con	_____	___/___
_____	con	_____	con	_____	___/___

RESIDUOS

9 ¿Qué hace con los residuos del cultivo de maíz que quedan después de la cosecha?

- .1 Venderlos
- .2 Alimentar ganado
- .3 Quemarlos
- .4 Otro _____

Especifique

10 ¿Qué hace con los residuos del cultivo de trigo que quedan después de la cosecha?

- .1 Venderlos
- .2 Alimentar ganado
- .3 Quemarlos
- .4 Otro _____

Especifique

11 ¿Qué hace con los residuos del cultivo de sorgo que quedan después de la cosecha?

- .1 Venderlos
- .2 Alimentar ganado
- .3 Quemarlos
- .4 Otro _____

Especifique

SOBRE LA UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PARA GENERACIÓN DE BIOENERGÍA

12 ¿Estaría dispuesto a adoptar otra manera para deshacerse de los residuos?

- Sí, *pase a la pregunta 13*
- No, ¿Por qué?

13. ¿Pondría los residuos a disposición para algún proyecto de bioenergía que haga uso de los mismos?

- Sí, ¿Bajo qué condiciones?

- No, ¿Por qué?

¡Muchas gracias por su colaboración!

Bibliografía

- ALEMÁN-NAVA, G., MENESES-JÁCOME, A., CÁRDENAS-CHÁVEZ, D., DÍAZ-CHAVEZ, R., SCARLAT, N., DALLEMAND, J.-F., ORNELAS-SOTO, N., GARCÍA-ARRAZOLA, R. & PARRA, R. (2014). Bioenergy in Mexico: Status and perspective. *Biofuels Bioproducts & Biorefining* **9**, 8–20.
- BAUER, M. (2011). *Los dilemas energéticos de México y la reforma de PEMEX*. Presidencia de la República, Secretaría Ejecutiva del Consejo Consultivo de Ciencias.
- BORRÀS, J., DELEGIDO, J., PEZZOLA, A., PEREIRA, M., MORASSI, G. & CAMPS-VALLS, G. (2017). Clasificación de usos de suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección* **48**, 55–66.
- BREIMAN, L. (2001). Random Forests. *Machine Learnig* **45**(1), 5–32.
- CARD, D. (1982). Using Known Map Category Marginal Frequencies to Improve Estimates of Thematic Map Accuracy. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing* **48**(3), 431–439.
- CERDÁ, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Revistas ICE* , 117–140.
- CHEN, L., XING, L. & HAN, L. (2009). Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (13), 2689–2695.
- CHUVIECO, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones RIALP, S.A, segunda ed.
- CLIMATE-DATA.ORG (2018). Clima: Angamacutiro de la Unión. URL <https://es.climate-data.org/location/1027414/>.
- CONGALTON, R. & GREEN, K. (2009). *Assesing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and practices*. CRC Press, segunda ed.

- DI BLASI, C., TANZI, V. & LANZETTA, M. (1997). A study on the production of agricultural residues in Italy. *Biomass and Bioenergy* **12**(5), 321–331.
- FERNANDES, U. & COSTA, M. (2010). Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal. *Biomass & Bioenergy* (34), 661–666.
- FOURNEL, S., MARCOS, B., GODBOUT, S. & HEITZ, M. (2015). Predicting gaseous emissions from small-scale combustion of agricultural biomass fuels. *Bioresource Technology* (179), 165–172.
- GHILARDI, A., RIEGELHAUPT, E. & SALDAÑA, R. (2006). *Los recursos bioenergéticos en México*. Mundi-Prensa, pp. 15–32.
- GISLASON, P., BENEDIKTSSON, J. & SVEINSSON, J. (2006). Random Forest for land cover classification. *Pattern Recognition Letters* **27**(4), 294–300.
- IDAE (2007). *Energía de la biomasa*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Angamacutiro, Michoacán de Ocampo. Tech. rep., Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- JENSEN, J. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Prentice Hall, segunda ed.
- JIANG, D., ZHUANG, D., FU, J., HUANG, Y. & WEN, K. (2012). Bioenergy potential from crop residues in China: Availability and distribution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16), 1377–1382.
- JOHNSON, M., EDWARDS, R. & MASERA, O. (2010). Improved stove programs need robust methods to estimate carbon offsets. *Climatic Change* **102**(3), 641–644.
- KARTHA, S. & LARSON, E. (2000). *BIOENERGY PRIMER*. New York, EUA: United Nations Publications.
- KURCHANIA, A. (2012). Biomass Energy. *Biomass Conversion: The Interface of Biotechnology Chemistry and Materials Science* , 91–122.
- LORA, E. & ANDRADE, R. (2009). Biomass as energy source in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (13), 777–788.

- MATSUMURA, Y., MINOWA, T. & YAMAMOTO, H. (2005). Amount, availability, and potential use of rice straw (agricultural residue) biomass as an energy resource in Japan. *Biomass & Bioenergy* (29), 347–354.
- MD. MIZANUR, R. & PAATERO, J. (2012). A methodological approach for assessing potential of sustainable agricultural residues for electricity generation: South Asian perspective. *Biomass & Bioenergy* (47), 153–163.
- MÁRQUEZ, M. (2005). *Combustión y quemadores*. Marcombo.
- PASQUALETTI, M. & BROWN, M. (2014). Ancient discipline, modern concern: Geographers in the field of energy and society. *Energy Research & Social Science* **1**, 122–133.
- PUROHIT, P., TRIPATHI, A. & KANDPAL, T. (2006). Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues. *Energy* (31), 1321–1331.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2009). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.osgeo.org>.
- ROSILLO-CALLE, F. (2007). *The Biomass Assessment Handbook*. Earthscan.
- RSTUDIO TEAM (2015). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. RStudio, Inc., Boston, MA. URL <http://www.rstudio.com/>.
- SAGARPA (2015). *Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: diagnóstico nacional*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- SCARLAT, N., MARTINOV, M. & DALLEMAND, J.-F. (2010). Assesment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for energy use. *Waste Management* (30), 1889–1897.
- SENER (2017). *Balance Nacional de Energía*. URL <http://sie.energia.gob.mx>.
- SERRATO MONROY, C. & CEPEDA, V. L. (2016). Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el departamento de cundinamarca.
- SINGH, J. & GU, S. (2010). Biomass conversion to energy in India-A critique . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14), 1367–1378.

- SOLARTE-TORO, J., CHACÓN-PÉREZ, Y. & CARDONA-ALZATE, C. (2018). Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material. *Electronic Journal of Biotechnology* **33**, 52–62.
- TORRES, H. M. & NAVARRO, O. I. (2010). Generación distribuida utilizando biomasa como energía renovable.
- VALDEZ-VAZQUEZ, I., ACEVEDO-BENÍTEZ, J. & HERNÁNDEZ-SANTIAGO, C. (2010). Distribution and potencial of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**(7), 2147–2153.
- VOIVONTAS, D., ASSIMACOPOULOS, D. & KOUKIOS, E. (2001). Assessment of biomass potential for power production: a gis based method. *Biomass and Bioenergy* (20), 101–112.