

CASO PRÁCTICO

Clasificación de usos y cubiertas del suelo y análisis de cambios en los alrededores de la Reserva Ecológica Manglares Churute (Ecuador) mediante una serie de imágenes Sentinel-1

Vélez, D.A., Álvarez-Mozos, J. *

Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra, Edificio Los Tejos, Campus Arrosadia, 31006 Pamplona, España.

Resumen: La gestión de las áreas naturales protegidas frecuentemente obvia la importancia que tiene el territorio que rodea el perímetro del espacio protegido (zona de amortiguación). Estas zonas pueden ser el origen de impactos que amenacen el estado de conservación de los ecosistemas protegidos. En este artículo se describe un caso de estudio centrado en la Reserva Ecológica Manglares Churute (REMCh) de Ecuador, en el que se utilizó una serie temporal de imágenes Sentinel-1 para clasificar los usos y cubiertas del suelo y para analizar los cambios ocurridos en el periodo 2015-2018. Tras procesar la serie de imágenes y delinear el conjunto de zonas de entrenamiento sobre los principales usos y cubiertas se implementó un algoritmo de clasificación *Random Forests* (RF), cuyos parámetros fueron optimizados mediante una validación cruzada con el conjunto de datos de entrenamiento (70% de la verdad campo). El 30% restante se utilizó para validar la clasificación realizada, logrando una fiabilidad global del 84%, un coeficiente Kappa de 0,8 y unas métricas de rendimiento por clase satisfactorias para los principales cultivos y usos del suelo. Los resultados fueron peores para las clases más heterogéneas y minoritarias, no obstante, se considera que la clasificación fue lo suficientemente precisa para realizar el análisis de cambios perseguido. Entre 2015 y 2018 se constató un aumento en la superficie destinada a usos intensivos como el cultivo de camarón blanco y la caña de azúcar, en detrimento de otros cultivos tradicionales como el arroz o el banano. Aunque estos cambios se produjeron en las zonas que rodean al área natural protegida, pueden causar un deterioro de la calidad del agua debido al uso de fertilizantes y pesticidas, por tanto, se recomienda prestar atención a estas zonas de amortiguamiento a la hora de diseñar políticas e instrumentos adecuados de protección medioambiental.

Palabras clave: Sentinel-1, clasificación, análisis de cambios, *Random Forest*, áreas de amortiguamiento.

Land use and land cover classification and change analysis in the area surrounding the Manglares Churute Ecological Reserve (Ecuador) using Sentinel-1 time series

Abstract: Management practices adopted in protected natural areas often ignore the relevance of the territory surrounding the actual protected land (buffer area). These areas can be the source of impacts that threaten the protected ecosystems. This paper reports a case study where a time series of Sentinel-1 imagery was used to classify the land-use/land-cover and to evaluate its change between 2015 and 2018 in the buffer area around the

To cite this article: Vélez, D.A., Álvarez-Mozos, J. 2020. Land use and land cover classification and change analysis in the area surrounding the Manglares Churute Ecological Reserve (Ecuador) using Sentinel-1 time series. *Revista de Teledetección*, 56, 131-146. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.14099>

* Corresponding author: jesus.alvarez@unavarra.es

Manglares Churute Ecological Reserve (REMCh) in Ecuador. Sentinel-1 scenes were processed and ground-truth data were collected consisting of samples of the main land-use/land-cover classes in the region. Then, a Random Forests (RF) classification algorithm was built and optimized, following a five-fold cross validation scheme using the training dataset (70% of the ground truth). The remaining 30% was used for validation, achieving an Overall Accuracy of 84%, a Kappa coefficient of 0.8 and successful class performance metrics for the main crops and land use classes. Results were poorer for heterogeneous and minor classes, nevertheless the performance of the classification was deemed sufficient for the targeted change analysis. Between 2015 and 2018, an increase in the area covered by intensive land uses was evidenced, such as shrimp farms and sugarcane, which replaced traditional crops (mainly rice and banana). Even though such changes only affected the land area around the natural reserve, they might affect its water quality due to the use of fertilizers and pesticides that easily. Therefore, it is recommended that these buffer areas around natural protected areas be taken into account when designing adequate environmental protection measures and policies.

Key words: Sentinel-1, classification, change analysis, Random Forests, buffer areas.

1. Introducción

El Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador alberga a 56 reservas naturales, que cubren aproximadamente un 20% del territorio nacional (Elbers, 2011). La Reserva Ecológica Manglares Churute (REMCh) forma parte de este sistema desde 1979, siendo único por la gran diversidad de ecosistemas que posee (Yanez, 2000), también está incluida en la lista de sitios Ramsar desde 1990 y actualmente se encuentra bajo la administración del Ministerio del Ambiente del Ecuador.

Uno de los aspectos más críticos en el manejo de ésta y otras áreas protegidas es determinar los cambios en el uso del suelo en las áreas vecinas o lo que se conoce como área de amortiguación que corresponde a la zona de transición entre los sistemas naturales y los usos intensivos de la tierra. En el año 2015 más de la mitad (58%) del área de amortiguación (1 km) alrededor de la REMCh, estuvo ocupada por tres cultivos: arroz, banano y caña de azúcar (IEE, 2015) que utilizan agroquímicos de distintos tipos para el control de insectos, hongos y malezas y por granjas acuícolas destinadas al cultivo de camarón cuyo proceso de cría produce incrementos de salinidad del agua, el uso de químicos para el control de peces depredadores y la muerte de aves que se alimentan de camarón en las piscinas (Morshed et al., 2020).

Un cambio de uso de suelo alrededor de la REMCh, es un motivo de preocupación por parte de sus administradores porque puede afectar la conservación de los recursos naturales que protegen, es así que, para maximizar el potencial de

las áreas, quienes la administran necesitan estar al tanto de lo que ocurre a su alrededor, para tomar las decisiones correctas para el éxito de su gestión (Hockings, 2003).

Existe una propuesta de manejo para la reserva (Yanez, 2000), en la que se incluye una serie de programas para su administración y gestión. Sin embargo, su conservación no solo dependerá de las actividades que se realicen al interior de la reserva sino de las acciones a su alrededor que tengan influencia directa sobre ella. En 1997 se construyó un sistema de canales para minimizar los daños causados por las inundaciones estacionales en los diferentes usos del suelo alrededor de la REMCh. Desde ese momento el área de amortiguación del área protegida ha sufrido cambios. Antes del año 1997, la parte septentrional y oriental del sector norte de la REMCh estaba cubierta principalmente por pastos naturales que eran aprovechados por una ganadería extensiva. Posteriormente ha sido ocupada por distintos usos del suelo, algunos de los cuales (como el cacao y los pastos naturales) pueden ser beneficiosos para los objetivos de conservación de la biodiversidad de la REMCh y otros (como el cultivo de arroz o la acuicultura del camarón) en cambio, representan una amenaza, lo que requiere diseñar estrategias de manejo consensuado con los propietarios. Para ello resulta crucial contar con información actualizada y fiable sobre los usos del suelo en estas zonas y los eventuales cambios que estén ocurriendo.

La monitorización de los usos del suelo en áreas extensas se puede abordar de forma idónea mediante imágenes satelitales (Chuvieco y Huete,

2010). Sin embargo, en zonas tropicales y húmedas en donde la cobertura nubosa es constante como en la zona de estudio, el uso de imágenes adquiridas por sensores ópticos se ve seriamente limitado, es por ello que la disponibilidad de series temporales de imágenes radar constituyen una alternativa de gran interés para abordar este tipo de estudios (Mercier et al., 2019). Desde la puesta en marcha del programa Copernicus, y en concreto de la misión Sentinel-1 (Torres et al., 2012), el desarrollo de aplicaciones de teledetección radar al estudio del territorio se ha acelerado incluyendo aplicaciones tales como la realización de cartografía de usos y cubiertas del suelo (Mercier et al., 2019), el monitoreo del sector agrícola (Schlund y Erasmi, 2020), la gestión forestal (Dostalova et al., 2018) e incluso aplicaciones acuícolas (Ottinger et al., 2017).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los cambios de uso del suelo en los alrededores de la Reserva Manglares Churute (REMCh) entre 2015 y 2018, utilizando una serie temporal de imágenes Sentinel-1 y el algoritmo de clasificación *Random Forest*. El estudio constituye un caso práctico que puede ser replicable en otras zonas del mundo de características similares dado que utiliza observaciones y herramientas de análisis disponibles libremente.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) comprende aproximadamente 123 000 ha, de las cuales 50 000 ha pertenecen a la REMCh, ubicada en el cantón Naranjal (zona continental) y en el cantón Guayaquil (islas) en la provincia del Guayas, en Ecuador. Entre los cultivos que predominan en el área están la caña de azúcar industrial (25%), arroz (24%), acuicultura camaronera (14%), banano (9%), cacao (4%), palma (1%), en menor proporción, los pastos, maíz, teca, y vegetación herbácea y arbustiva (IEE, 2015). Otras de las actividades económicas que se desarrollan en la zona son la ganadería y el ecoturismo (Rivadeneira-Roura y Rivera Rossi, 2007).

La REMCh se encuentra en una llanura fluvio-marina, con pendiente menor a 5%, de un área conocida como Cuenca Baja del Río Guayas que se extiende desde el estuario del río Guayas, al Oeste,

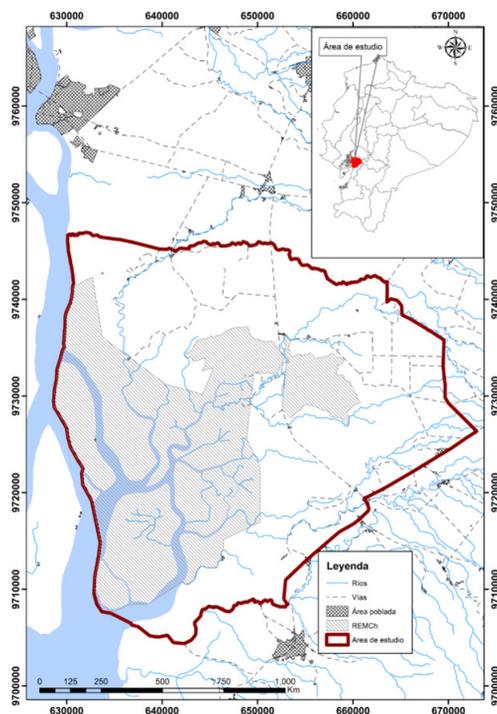


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

hasta el piedemonte de la cordillera occidental de los Andes, al Este. Esta zona forma parte de cinco subsistemas hidrográficos que la drenan: Jujan, Chimbo - Yaguachi, Taura-Boliche-Bulubulu, Churute y Cañar. Estos ríos inundaban la planicie, de la zona costera del Ecuador durante la estación lluviosa (diciembre a marzo), hasta que el estado ecuatoriano construyó un sistema de control de inundaciones que opera desde el año 1997.

En el extremo oeste de la Cuenca Baja y antes de que los ríos Taura, Churute y Cañar descarguen en el estuario del río Guayas, se encuentra la REMCh. En su interior se conserva bosque de manglar, bosque seco, bosque húmedo de neblina y vegetación acuática (Navarrete, 2000). La REMCh protege tres importantes ecosistemas: la Laguna El Canclón, la Cordillera de Churute y los remanentes de manglar (Rivadeneira-Roura y Rivera Rossi, 2007). En estos variados hábitats existen distintas especies de mamíferos, aves, anfibios, reptiles e invertebrados endémicos de la región seca del oeste de Ecuador y Perú. Por su lado, las especies estuarinas más comunes son: mejillones (*Mytella guayanensis*), el cangrejo rojo (*Ucides occidentalis*), ostiones

(*Cassostrea columbiensis*), que son la principal fuente de ingresos económicos de pescadores artesanales y también la operación de granjas destinadas al cultivo de camarón blanco (*Penaeus vannamei*), algunas de las cuales existen desde antes de la creación de la REMCh (Rivadeneira-Roura y Rivera Rossi, 2007).

2.2. Imágenes Sentinel-1

La descarga de las imágenes Sentinel-1 se realizó desde el portal *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>), previo registro. Se descargaron 12 imágenes Sentinel 1A y 1B adquiridas durante 2018, a razón de una imagen mensual. Todas las imágenes fueron adquiridas en el modo *Interferometric Wide Swath* (IW) en polarización doble VV-VH, en pasada ascendente y en la misma órbita relativa (18) para evitar variaciones en la geometría de adquisición. Las imágenes se descargaron como productos de nivel 1.5 *Ground Range Detected* (GRD), que vienen en unidades de amplitud codificadas en 16 bits, están ya proyectados en geometría terreno (*Ground Range*), con un procesado multilook de 1×5 looks y se distribuyen con un tamaño de píxel de 10 m.

2.3. Procesamiento de las imágenes Sentinel-1

Las imágenes Sentinel-1 GRD deben someterse a varias correcciones radiométricas y geométricas

para dotarlas de una geometría precisa y transformarlas a unidades de coeficiente de retrodispersión corregido topográficamente (γ^0) en decibelios y formato geotif. El proceso se realizó mediante el software SNAP creando un modelo que incorpora todos los procesos necesarios y se puede aplicar de forma masiva a toda la serie. Este modelo realizó los siguientes procesos (1) recorte al área de estudio, (2) actualización de los datos orbitales, (3) calibración a unidades lineales de coeficiente de retrodispersión (β^0), (4) filtro de moteado multitemporal con un tamaño de ventana de 3×3, (5) corrección topográfica (Small, 2011), (6) ortorectificación, (7) transformación a decibelios, (8) cálculo del ratio de polarización cruzada (VH/VV) y (9) exportado a geotif.

Las imágenes procesadas se unieron en un único archivo (stack) con 36 bandas en total (12 fechas y tres canales de polarización: VV, VH y VH/VV). Esto resulta útil para representar composiciones RGB multitemporales (Figura 2) y explorar la dinámica temporal del fenómeno de retrodispersión en la zona.

2.4. Preparación de las áreas de entrenamiento y validación

La clasificación supervisada requiere de un cierto conocimiento de la zona de estudio, para delimitar áreas representativas de las distintas categorías (clases) que se utilizarán para entrenar

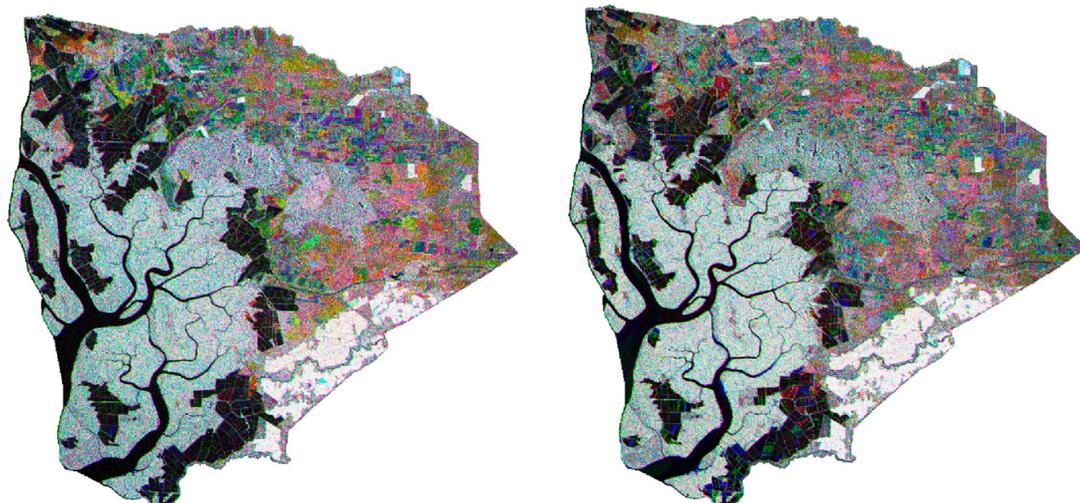


Figura 2. Composiciones RGB multitemporales (R: febrero, G: junio, B: octubre).

el clasificador, así como para validarlo (Chuvieco y Huete, 2010). Partiendo del conocimiento de la zona y de cartografía disponible a distintas escalas (IEE, 2020; IGM, 2020), se levantaron una serie de puntos en terreno correspondientes a cada clase y posteriormente se delimitaron polígonos alrededor de los mismos utilizando imágenes de alta resolución disponibles en *Google Earth*. De estas áreas, se seleccionó aleatoriamente un 70% como muestra de entrenamiento y el restante 30% se utilizó para la validación. En la Tabla 1, se muestra la superficie total por clase de los polígonos de entrenamiento y validación y en la Figura 3 su distribución espacial.

Tabla 1. Superficie de las zonas de entrenamiento y validación de cada clase.

Clases	Area (ha)	
	Train	Test (Validación)
Arroz	152	64
Banano	394	178
Bosque	101	32
Cacao	81	48
Camarón	596	266
Caña de azúcar	395	86
Palma	38	22
Manglar	337	158
Pastizal	7	3
Total	2101	857

Se utilizaron nueve categorías para realizar la clasificación: arroz, banano, bosque, cacao, camarón, caña de azúcar, palma, manglar y pastizales (Figura 4). El arroz (*Oryza sativa*) es uno de los principales productos de la canasta básica en los hogares ecuatorianos, es una gramínea que alcanza los 60-120 cm de altura, que se cultiva en ciclos de 120-140 días dependiendo de la variedad. Se distinguen tres fases en su desarrollo: vegetativa (0-60 días), reproductiva (60-100 días) y madurez (100-140 días). Durante las dos primeras fases las parcelas se mantienen inundadas, pero en la última el terreno se deja secar para facilitar la maduración y cosecha del grano.

El banano (*Musa paradisiaca*) es el primer producto de exportación no petrolera de Ecuador. Es una planta herbácea perenne que alcanza una altura de 3,5 a 7,5 m y tiene un periodo de vida de 13 meses. Su propagación se produce de forma vegetativa mediante nuevas plántulas que surgen del rizoma de la planta madre. Se distinguen las siguientes fases de desarrollo: infantil, independiente y reproductiva. La fase infantil (0-160 días) va desde la aparición de la yema lateral en la base de la planta madre hasta que el hijo se hace independiente de la misma. La fase independiente

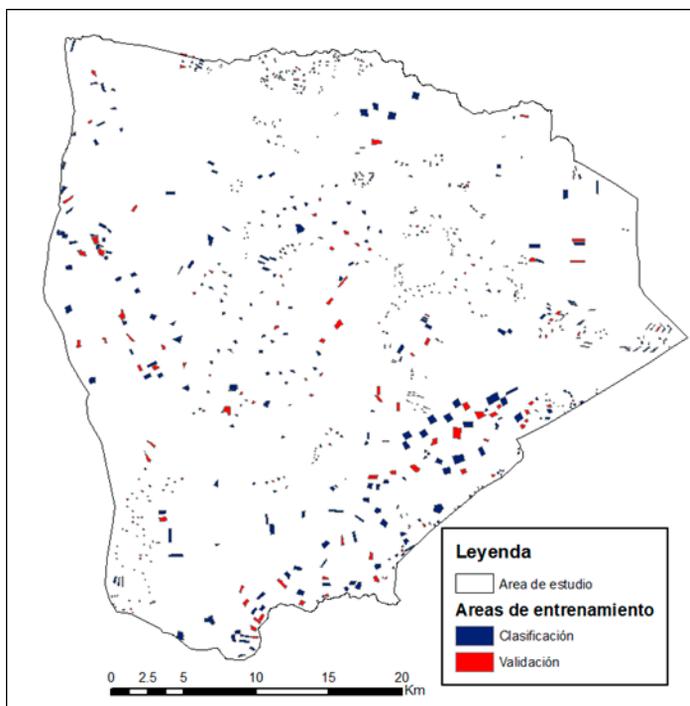


Figura 3. Distribución espacial de las áreas de entrenamiento y validación.

(160-220 días), está demarcada por la emisión de la primera hoja del hijo, y una vez independiente comienza a desarrollar hojas de tamaño normal. La fase reproductiva (220-390) empieza desde el inicio de la floración hasta la cosecha del racimo.

El Cacao (*Theobroma cacao*), llamado también ‘pepa de oro’ es una planta perenne cuya altura oscila entre 4 y 7 metros dependiendo de su variedad. Se cultiva solo o asociado con otras especies. Su crecimiento es rápido y la fructificación empieza entre el segundo y tercer año a partir de la siembra. La cosecha inicia cuando el fruto ha alcanzado su madurez, la cual se da por el cambio de coloración, que depende de la variedad.

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es también un producto de exportación, pero en menor proporción en comparación con el banano y el cacao. Es una gramínea anual, que tiene un tallo

macizo de 2 a 5 metros de altura con unos 5 o 6 cm de diámetro. Tiene cuatro fases de desarrollo: emergencia (0-35 días), amacollamiento o ahijamiento (35-90), rápido crecimiento (90-270 días) y maduración (270-360 días). Aproximadamente al año edad se realiza la primera cosecha (corte o zafra), luego el cultivo rebrota y puede ser sometido a sucesivos cortes, habitualmente hasta cinco, en ciclos anuales, posteriormente se realiza la renovación de la plantación.

La palma (*Elaeis oleifera*) es una planta perenne cultivada para la extracción de aceite. La producción se inicia a partir de los 2 a 2,5 años de edad y la duración de una plantación puede superar los 20-30 años con ejemplares que pueden alcanzar una altura de hasta 20 metros. Su expansión es considerada como uno de los principales agentes de deforestación en el Ecuador.



Figura 4. Muestra de las clases consideradas: a) arroz, b) banano, c) cacao, d) caña, e) palma, f) bosque, g) manglar, h) pastizal e i) camarón.

La clase denominada Bosque incluye remanentes de bosque seco tropical y bosque húmedo existente principalmente en alturas intermedias y altas de los cerros (Yanez, 2000). La diversidad florística de estas masas es notable, incluyendo tanto especies de hoja perenne como caducifolias que fácilmente alcanzan los 20 m y siendo habitual un denso sotobosque (Rivadeneira-Roure y Rivera Rossi, 2007).

El Manglar cubre el 6 % de la REMCh. Es un tipo de formación vegetal con un dosel cerrado de hasta 10-12 m de altura que se desarrolla en la interfaz de tierra firme hacia mar abierto. Es una vegetación típica de los márgenes de los esteros con influencia de la marea donde presenta las características raíces zancudas (Rivadeneira-Roure y Rivera Rossi, 2007).

La clase Pastizal, incluye tanto vegetación herbácea como arbustiva (matorral) de poca altura y se encuentra de forma dispersa en toda la zona de estudio. La vegetación herbácea, por lo general de tipo gramínea, mantiene el verdor constante y es utilizada con fines de pastoreo. Ésta aparece frecuentemente asociada a vegetación arbustiva lignificada de poca altura que pierde sus hojas en la temporada seca y en ocasiones se presentan arboles aislados dominantes.

El camarón (*Penaeus vannamei*) es un cultivo acuícola de alto rendimiento que se empezó a desarrollar en la zona a partir de los años 50 pasando a ser en poco tiempo el segundo mayor producto de exportación no petrolera de Ecuador después del banano. Su sistema de producción es intensivo y tiene lugar en piscinas o balsas, donde se desarrollan los ejemplares de camarón en alrededor de cuatro meses hasta lograr el peso y las medidas deseadas. En función de su intensidad el sistema de producción puede variar entre 1 a 2,5 ciclos al año; al finalizar cada ciclo se realiza el vaciado de las piscinas y su preparación para recibir a un nuevo lote de larvas comenzando un nuevo ciclo (Palacios, 2016).

2.5. Clasificación de la zona en 2018

Para realizar la clasificación se utilizó el algoritmo *Random Forests* (RF) (Breiman, 2001) disponible en los paquetes caret (Kuhn et al., 2020) y randomForest (Liaw y Wiener, 2020) del entorno R (R Core Team, 2017). RF forma un

conjunto de k árboles de decisión independientes siguiendo dos premisas: (1) Los árboles se crean de forma automática a partir de un subconjunto de datos seleccionado aleatoriamente y con reemplazo. (2) Los nodos de cada árbol se dividen utilizando la variable que maximice el índice de Gini del conjunto de datos entre un subconjunto de m variables predictivas seleccionadas también al azar. El subconjunto de datos que no se utiliza en la creación de cada árbol (*out of bag sample* o *oob*) se utiliza para calcular una medida interna de error (*oob error*). Una vez construido el clasificador, al aplicarlo para clasificar una nueva instancia cada árbol propone una clase y la asignación final se hace por mayoría. El porcentaje de voto de la clase mayoritaria se puede utilizar además como un indicador de certeza de la predicción. También se puede realizar un análisis de la importancia de las variables predictivas mediante su permutación y evaluando el descenso en el índice de Gini medio en los nodos o el aumento del *oob error*.

Para optimizar los parámetros del modelo (número de árboles k y número de variables predictivas m) se tomó el conjunto de entrenamiento y se realizó una validación cruzada con cinco particiones. Sobre este conjunto se construyeron clasificadores explorando valores de m entre 2 y 35 y valores de k entre 1 y 1000, obteniendo unos parámetros óptimos de $m=10$ y $k=500$ que produjeron una fiabilidad global máxima de 0,87. Con estos parámetros se construyó el clasificador final entrenándolo con las muestras de entrenamiento y validándolo con las de validación (que no se usaron en la optimización de los parámetros).

Para la validación se calcularon las métricas de rendimiento típicas a partir de la matriz de confusión, que representa los aciertos y errores en la clasificación de las muestras de validación (Chuvieco y Huete, 2010). En concreto, se calculó la fiabilidad global de la clasificación y las siguientes métricas de fiabilidad de cada cultivo: fiabilidad del productor, fiabilidad del usuario e índice Kappa.

2.6. Detección de cambios entre 2015 y 2018

Para cuantificar la variación en el uso del suelo en la zona de amortiguamiento de la reserva, se

realizó un análisis de cambios entre la clasificación obtenida en 2018 y la cartografía disponible de 2015. El análisis se centró en los cultivos de arroz, caña de azúcar, banano y camarón, por ser los más importantes en la zona en cuanto a su extensión e importancia en su producción y comercio. El resto de cultivos (palma, caco y pastizales) se agruparon en una categoría denominada “Otros cultivos”. Para el análisis de cambios no se consideraron el manglar ni el bosque ya que son categorías que se encuentran dentro de la REMCh, y sus límites se consideran estables y bien definidos.

El análisis de cambios se realizó en primer lugar en la zona de amortiguamiento, definida como una franja de 1 km alrededor de la reserva (zona *buffer*) y en segundo lugar en el resto del área de estudio (Figura 5). Aunque en 1992 se definió la zona de amortiguamiento como una franja de 100 metros de ancho en la falda de los cerros (Yanez, 2000), en este estudio se ha considerado más adecuado ampliarla a 1 km.

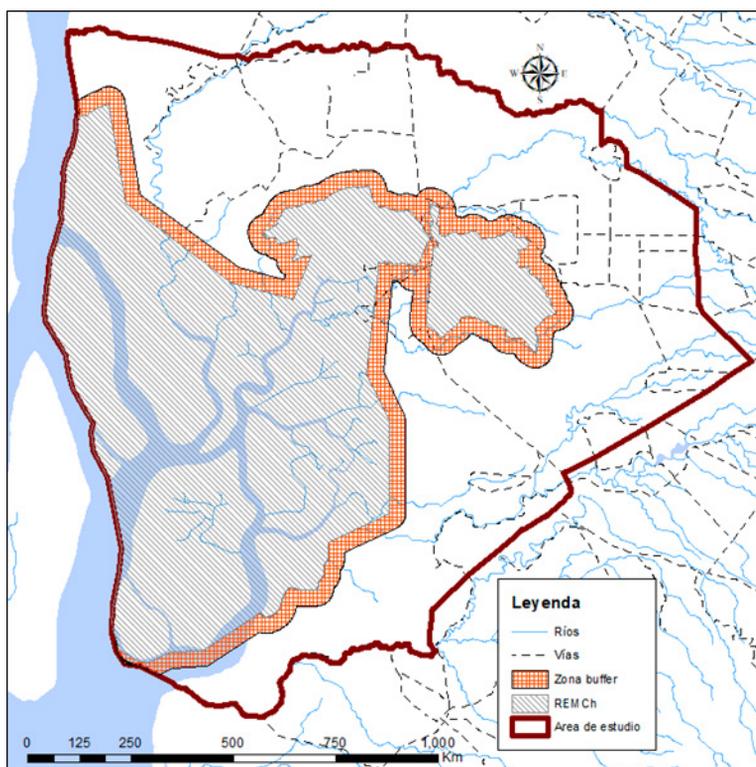


Figura 5. Delimitación de la zona de amortiguamiento (*buffer*) alrededor de la reserva y del resto del área de estudio para el análisis de cambios.

3. Resultados y discusión

3.1. Clasificación de 2018

El resultado de la clasificación RF de 2018 fue satisfactorio, tanto en lo que respecta a la apariencia general del mapa clasificado (Figura 6) como a la matriz de confusión (Tabla 2) y métricas de rendimiento obtenidas. La fiabilidad global obtenida con el conjunto de datos de validación fue de un 84% y el coeficiente de Kappa global de 0,80. La distribución espacial de las clases parece adecuada, mostrándose un perímetro bien definido de manglar en la zona de la REMCh y de bosque en la zona de sierra en su extremo noreste. Las manchas de diferentes cultivos aparecen también bastante bien definidas sin una excesiva apariencia de sal y pimienta característica de las clasificaciones por píxel.

En la matriz de confusión se puede observar que las clases mayoritarias como el banano, el arroz, el manglar o las camaroneras fueron correctamente identificadas. No obstante, clases

Tabla 2. Matriz de confusión.

Clases	Caña de									
	Arroz	Banano	Bosque	Cacao	Camaron	azúcar	Palma	Manglar	Pastizal	Total
Arroz	3495	0	37	48	168	282	130	91	10	4261
Banano	0	17238	48	54	0	0	0	341	0	17681
Bosque	131	16	1388	761	0	17	108	824	144	3389
Cacao	120	0	115	624	0	49	213	137	10	1268
Camaron	31	0	4	5	26317	6	2	26	10	26401
Caña de azúcar	2493	1	393	1345	83	8251	1390	279	101	14336
Palma	22	0	1	129	0	7	133	22	0	314
Manglar	31	525	1189	1805	2	14	195	14067	42	17870
Pastizal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	6323	17780	3175	4771	26570	8626	2171	15787	317	85520

minoritarias como los pastizales, el bosque o el cacao no obtuvieron resultados tan satisfactorios. Las principales confusiones se produjeron entre los siguientes pares de clases: Arroz-Caña de azúcar, Bosque-Manglar, Cacao-Caña de azúcar, Cacao-Manglar, Palma-Caña de azúcar, Pastizal-Bosque y Pastizal-Caña de azúcar (Tabla 2).

Las series temporales medias de las distintas clases (Figura 7) ayudan a interpretar los resultados de la clasificación. La mayoría de clases no muestran ningún patrón estacional, con excepción de los Pastizales y la Caña de azúcar, que tienen una menor retrodispersión (sobre todo en VH) a partir de agosto, lo que coincide con la estación seca,

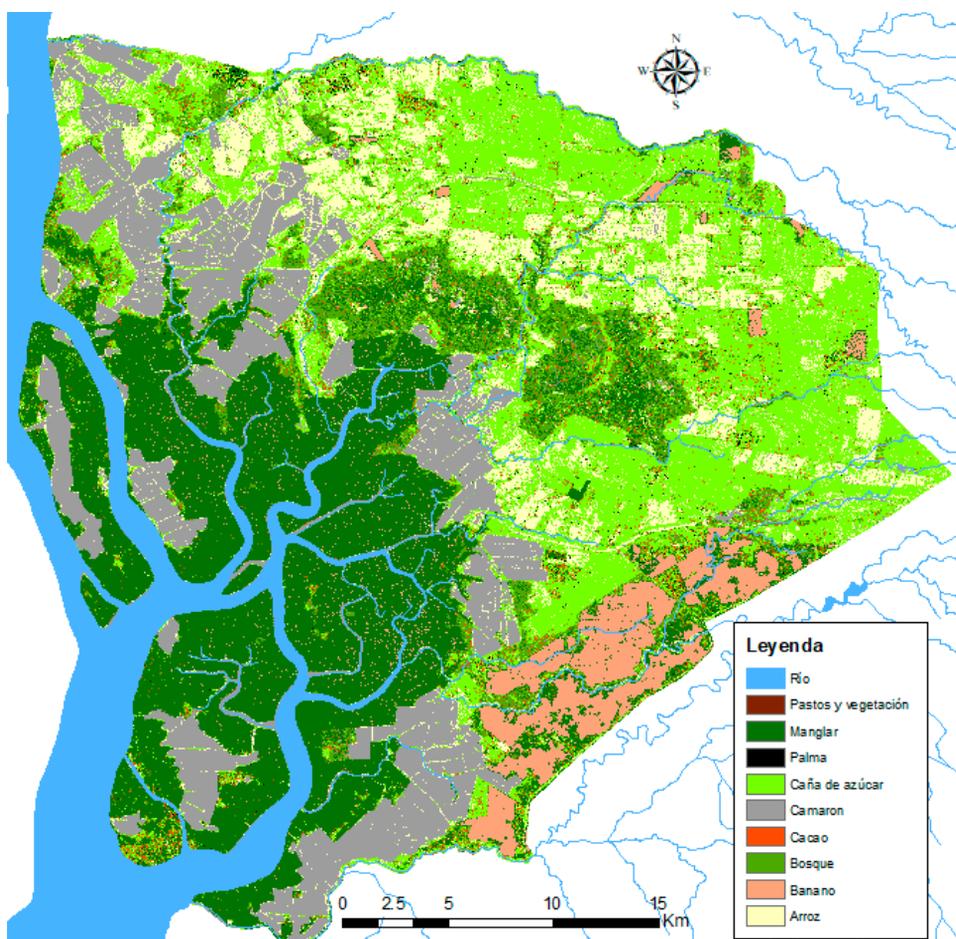


Figura 6. Resultado de la clasificación RF de 2018.

aunque esta reducción no es muy marcada. Salvo estos dos casos, el resto de clases se mantienen estables en el tiempo, lo que es característico de las cubiertas vegetales en zonas tropicales (Mercier et al., 2019). El uso de series temporales más densas de imágenes Sentinel-1 (e.g., cada 12 días)

permitirían confirmar este resultado. Por otro lado, tanto en VV como en VH las clases con mayor retrodispersión son el Banano y el Manglar, y al contrario las que producen menor retrodispersión son el Camarón seguido del Arroz. El Arroz y la Caña de azúcar tienen series temporales casi

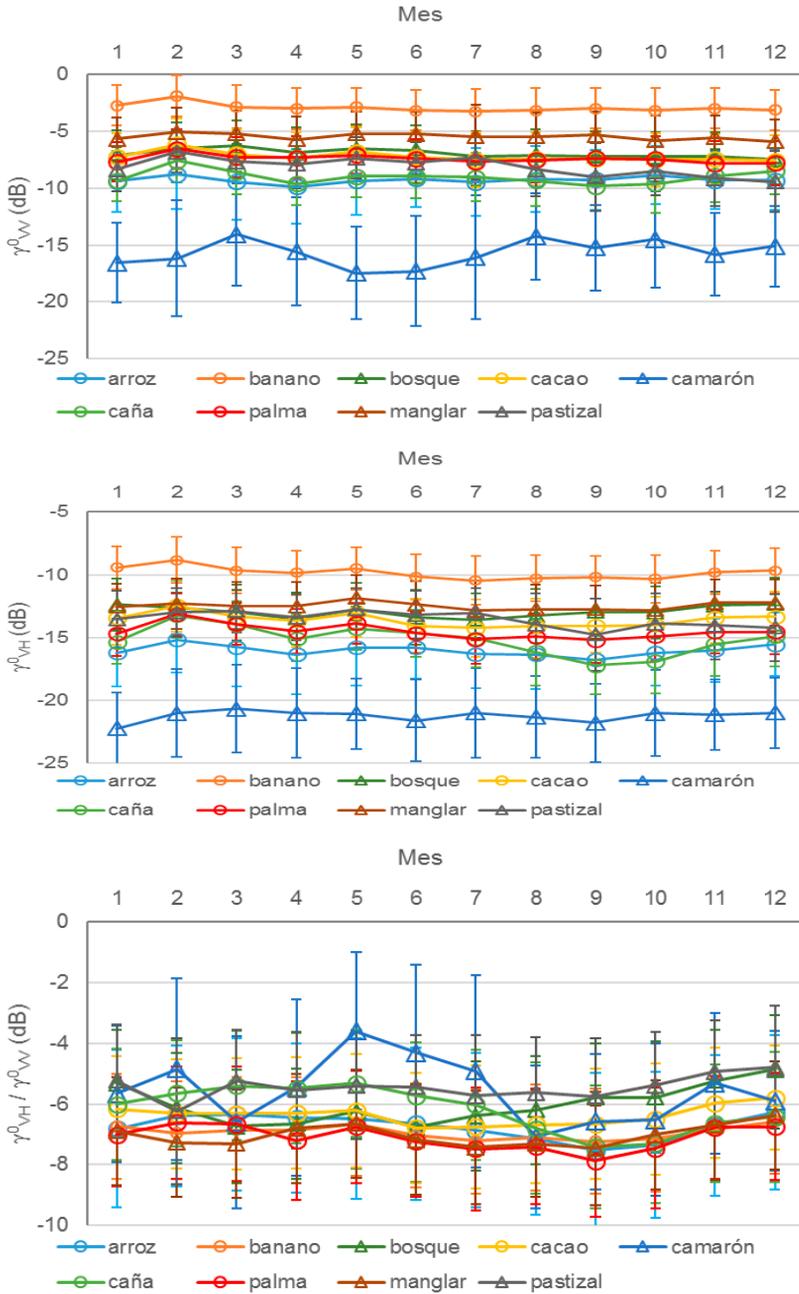


Figura 7. Series temporales medias de las clases estudiadas para las polarizaciones VV, VH y el ratio VH/VV. Las barras de error representan una desviación estándar.

idénticas en VV y también en VH a partir de agosto. Otras clases con patrones temporales muy parecidos son la Palma y el Cacao o el Bosque y el Manglar.

El ratio VH/VV muestra un mayor solapamiento que las polarizaciones VV o VH, por lo que su capacidad de diferenciación de las clases estudiadas parece reducida. Por último, las clases con mayor variabilidad (barras de error en la Figura 7) son, con diferencia, el camarón y el arroz lo que se explica porque los ciclos de vaciado y limpieza de las piscinas de camarón o de inundación y secado de las parcelas de arroz no siguen un patrón temporal preestablecido, con lo que en una misma fecha pueda haber piscinas llenas y vacías o parcelas de arroz recién sembradas y otras listas para cosechar.

En la Tabla 3 se representa la fiabilidad del usuario y productor de cada una de las clases. Por un lado, la heterogeneidad de clases como los pastizales y el bosque parecen dificultar su identificación, lo que en cierto modo era esperable dada la diversidad en cuanto a tipos de vegetación y características bioclimáticas de estas clases. No obstante, se aprecia una relación entre las métricas de rendimiento de cada clase y su tamaño muestral en el entrenamiento, siendo mejor clasificadas las clases más frecuentes. La influencia del desequilibrio muestral en el clasificador RF ha sido documentada con anterioridad (Mellor et al., 2015) y existen técnicas para equilibrar sintéticamente

las muestras de entrenamiento (e.g., Chawla et al., 2002), pero para este estudio no se ha considerado necesario implementarlas dado que las clases de mayor interés para el análisis de cambios han sido clasificadas satisfactoriamente.

Tabla 3. Fiabilidad del usuario y productor.

Clases	Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario	Coefficiente Kappa
Arroz	55,27	82,02	0,81
Banano	96,95	97,49	0,97
Bosque	43,72	40,96	0,39
Cacao	13,08	49,21	0,46
Camaron	99,05	99,68	1,00
Caña de a.	95,65	57,55	0,53
Palma	6,13	42,36	0,41
Manglar	89,10	78,72	0,74
Pastizal	0	nan	nan

En cuanto al análisis de importancia de las variables predictivas realizado por el clasificador RF, tomando en cuenta la disminución de la precisión al permutar cada variable (Figura 8), se puede apreciar que en general la polarización VH resultó ser más valiosa que la VV, aunque en promedio anual las diferencias entre ambas son reducidas (0,05 vs. 0,04). El ratio de polarización cruzada VH/VV por su lado demuestra ser mucho menos importante, con un indicador de importancia un orden de magnitud inferior a VV o VH.

Se aprecia cierta estacionalidad en lo que respecta a la importancia de las fechas de adquisición, siendo las adquisiciones entre enero y mayo las

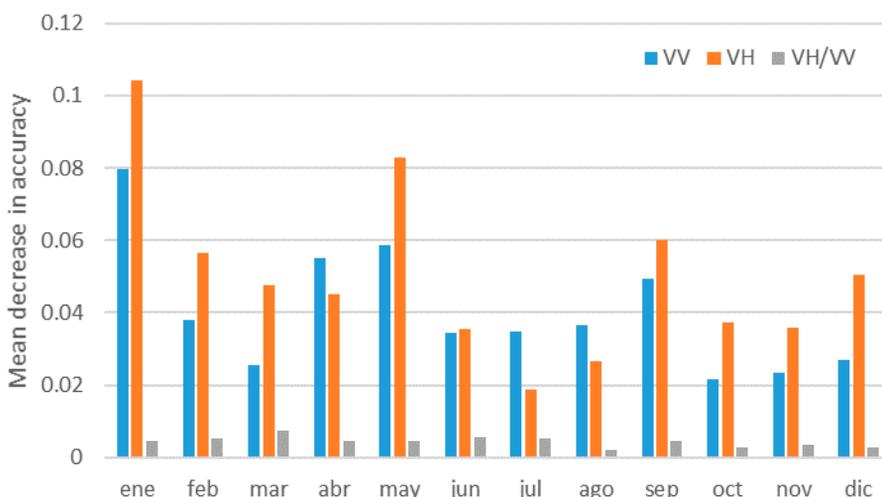


Figura 8. Análisis de la importancia de las variables predictivas.

más importantes junto con la de septiembre. El análisis de la importancia se puede particularizar a nivel de cada clase concreta (resultados no incluidos en el artículo). Aunque se aprecia que la mayoría de clases siguen un comportamiento similar al de la Figura 7; la clase Manglar muestra una mayor importancia de la polarización VV sin una estacionalidad definida y la clase Camarón, de la VH en los meses de noviembre a enero y en mayo, con una diferencia muy marcada respecto al resto de fechas.

Si bien los resultados obtenidos en la clasificación son buenos, ésta se podría tratar de mejorar sobre todo en lo que respecta a la clasificación de las clases minoritarias y de las clases heterogéneas. En el primer caso, como ya se ha mencionado se podría aplicar alguna técnica de equilibrado de clases, mientras que en el segundo se podría plantear la subdivisión de la leyenda en clases más homogéneas (e.g., bosque húmedo y bosque seco), aunque esto produciría nuevamente clases más pequeñas, lo que dificultaría obtener muestras suficientes de cada una de ellas. Otra opción sería plantear un esquema de

clasificación en varios niveles, clasificando en primer lugar en cuatro estratos: agrícola forestal, pastizal y agua, para luego volver a clasificar cada estrato en clases de usos y cubiertas más concretos. De forma adicional, la incorporación al análisis de la coherencia interferométrica, además de los coeficientes de retrodispersión, podría aportar mejoras en la clasificación (Jacob et al., 2019; Mestre-Quereda et al., 2020), así como el uso de una serie temporal más densa de imágenes Sentinel-1. Por último, la combinación con imágenes Sentinel-2 también podría aportar mejoras en la precisión de la clasificación (Mercier et al., 2019; Orynbaikyzy et al., 2019).

3.2. Análisis de cambios 2015-2018

La comparativa entre la clasificación realizada en 2018 y la cartografía disponible de 2015 ilustra algunos cambios que pueden indicar tendencias a corto y mediano plazo (Figura 9).

Aunque no se observen cambios drásticos en la distribución espacial de los principales usos del suelo, se aprecia un claro incremento en la

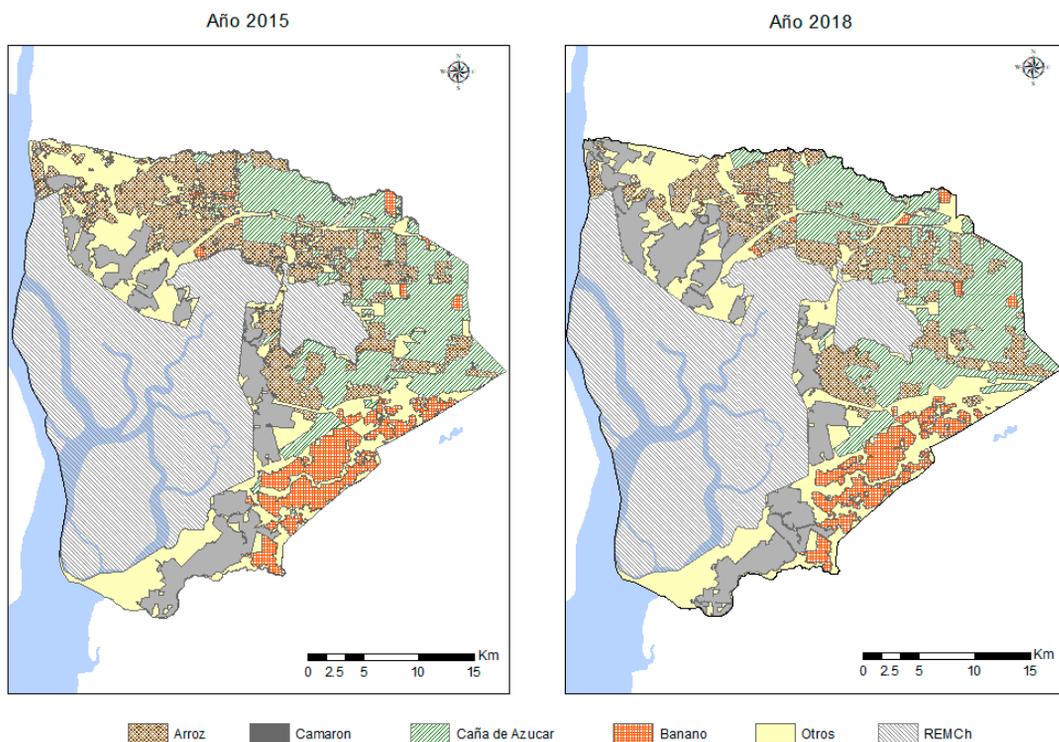


Figura 9. Análisis de cambios 2015-2018.

superficie destinada a la acuicultura del camarón y en menor medida a la caña de azúcar, en detrimento de otros cultivos como el banano y, sobre todo, el arroz (Tabla 4). Estos cambios se producen tanto en la propia área de amortiguamiento como en el resto de la zona de estudio, siendo más acusados en el extremo Norte-Noroeste en comparación con el extremo Sur-Sudeste que parece haber sufrido menos cambios.

La crisis en el sector camaronero de Centroamérica y Asia entre 2010 y 2013 causada por una enfermedad de difícil control (Tran et al., 2013), produjo un incremento del número y superficie de las piscinas dedicadas a este producto en la zona de estudio (Palacios, 2016). En 2018 se aprecia que este uso ha ocupado los terrenos localizados en los márgenes de esteros con influencia de la marea, donde antes existía pasto natural y parcelas de arroz. Por otro lado, la superficie cultivada con arroz a nivel nacional disminuyó drásticamente en 2017 respecto a 2016, en torno a un 20% (MAG, 2020a), siendo esa reducción también palpable en las zonas cercanas a la REMCh, donde zonas antes cultivadas con arroz han sido reemplazadas por camaroneras y caña de azúcar (Figura 9). La superficie nacional cosechada de caña de azúcar también se incrementó en el 2017 respecto al 2016 (MAG, 2020b), por su interés para la exportación de productos como los azúcares y alcoholes de distinto tipo.

En general, la tendencia de uso del suelo alrededor de la REMCh es la de incrementar el área ocupada por usos intensivos en insumos como el camarón y la caña de azúcar. Estos cambios incrementan los riesgos de impactos sobre los recursos naturales que protege la REMCh. Cabe recordar, que la construcción en 1997 de un sistema de canales de alivio para regular el régimen

estacional de inundaciones es la infraestructura que en última instancia ha permitido en gran medida la intensificación del uso de esta zona, que antiguamente se destinaba exclusivamente a los pastizales y cultivos estacionales.

En Ecuador, las áreas alrededor de los límites de las áreas naturales protegidas no tienen un régimen de manejo especial, pero son parte de los objetivos de manejo de la unidad protegida. Sin embargo, las áreas naturales protegidas cuentan solo con recursos financieros y humanos limitados, por lo que no es factible un control permanente sobre estas áreas y se prevé un deterioro de la calidad ambiental de las áreas más cercanas al perímetro de las zonas protegidas. Para poder revertir esta situación, el Estado ecuatoriano podría iniciar un proceso de estímulos de certificación de las actividades con mayor probabilidad de producir impactos ambientales, como son la acuicultura del camarón y el cultivo de caña en la franja de un kilómetro alrededor de la REMCh. La certificación del camarón abre mercados más exigentes que generarían mayores beneficios económicos a los propietarios de las granjas a cambio de mejorar sus prácticas de producción y hacerlas más sostenibles, reduciendo los riesgos de contaminación del agua, las afecciones a otras especies estuarinas y los conflictos con los pescadores artesanales.

Para fomentar los cultivos de arroz y banano se requeriría un proceso que estimule la organización de los productores, su competitividad y rentabilidad, implementando tecnologías que permitan aumentar los rendimientos y reducir los costos de producción, pero asegurando la sostenibilidad y la reducción del riesgo de impactos sobre los recursos naturales de la REMCh.

Tabla 4. Cambios de uso de suelo 2015-2018.

Cultivo	Área de amortiguamiento			Alrededor > 1 km		
	2015	2018	Diferencia (ha)	2015	2018	Diferencia (ha)
Camarón	2716	2988	272	7256	9714	2458
Banano	118	79	-39	6478	5626	-852
Caña de azúcar	1070	1196	126	17212	17428	216
Arroz	2592	2010	-582	15164	12556	-2608
Otros	4801	5024	-223	16283	17068	786

4. Conclusiones

El seguimiento de los cambios en el uso del suelo, alrededor de áreas naturales protegidas, se puede realizar de forma relativamente sencilla mediante el uso de tecnologías basadas en la teledetección, utilizando datos y herramientas de libre acceso, tales como las imágenes de los satélites Sentinel del programa Copernicus de la ESA o herramientas como SNAP, QGIS o el entorno R. El perímetro de estas áreas protegidas puede ser origen de impactos que afecten la conservación de los ecosistemas a preservar, por tanto, resulta necesario monitorizar los eventuales cambios en el área de amortiguación y zonas aledañas.

En este estudio se ha demostrado que es posible determinar los cambios en el uso del suelo en los alrededores de la Reserva Ecológica Manglares Churute (REMCh) de Ecuador, utilizando imágenes radar Sentinel-1 e implementando una metodología sencilla y altamente automatizable, aunque es necesario contar con información fiable de campo para entrenar y validar el algoritmo de clasificación *Random Forests* (RF) utilizado. La precisión de la clasificación obtenida fue buena, con una fiabilidad global del 84% y un coeficiente Kappa de 0,8 y con métricas de rendimiento por cultivo adecuadas para las clases mayoritarias, aunque las clases más heterogéneas y minoritarias obtuvieron peores resultados.

Con este estudio se determinó que entre los años 2015 y 2018 se produjeron importantes cambios en el uso del suelo en los alrededores de la REMCh que podrían influir de forma negativa en la conservación de sus recursos naturales. Un incremento en el área dedicada a la acuicultura del camarón blanco y de cultivos agrícolas intensivos como la caña de azúcar deberían ser asuntos para analizar durante la elaboración del siguiente Plan Operativo de la Reserva Ecológica Manglares Churute. Aunque estos cambios se han producido en las áreas que rodean al área natural protegida no dejan de influir sobre la conservación de los recursos naturales de la reserva. Varias prácticas que se realizan en estos usos del suelo, como el uso de fertilizantes y pesticidas, causan el deterioro de la calidad del agua y conflictos con las comunidades locales y podrían ser mejoradas mediante el estímulo a la certificación de sus prácticas y al mismo tiempo mejorar el acceso a otros mercados.

Agradecimientos

Diana Vélez agradece la financiación recibida por la Fundación Carolina para la realización del Máster Universitario en SIG y Teledetección de la Universidad Pública de Navarra durante el curso 2018-2019. Se agradece a la consultora Ilimitconsul por su colaboración con los muestreos de campo y a los Biólogos Ronald Navarrete A. y Sandra Mora M. Las imágenes incluidas en la Figura 4 han sido cedidas para su uso mediante licencia CC BY 4.0.

Referencias

- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chawla, N.V., Bowyer, K.W., Hall, L.O., Kegelmeyer, W.P. 2002. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321-357. <https://doi.org/10.1613/jair.953>
- Chuvieco, E., Huete, A. 2010. *Fundamentals of satellite remote sensing*. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18954>
- Dostalova, A., Wagner, W., Milenkovic, M., Hollaus, M. 2018. Annual seasonality in Sentinel-1 signal for forest mapping and forest type classification. *International Journal of Remote Sensing*, 39 (21), 7738-7760. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1479788>
- Elbers, J. 2011. *Las áreas protegidas de América Latina: Situación actual y perspectivas para el futuro*. Quito-Ecuador: UICN.
- Hockings, M. 2003. Systems for Assessing the Effectiveness of Management in Protected Areas. *BioScience*, 53(9), 823-832. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0823:SFATEO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0823:SFATEO]2.0.CO;2)
- IEE. 2020. Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional Escala 1:25.000. En *Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE)*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de http://www.geoportaligm.gob.ec/proyecto_nacional
- IGM. 2020. Visor Geográfico del Instituto Geográfico Militar Ecuador. In *Geoportal IGM*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/>

- Jacob, A.W., Vicente-Guijalba, F., Lopez-Martinez, C., Lopez-Sanchez, J.M., Litzinger, M., Kristen, H., Mestre-Quereda, A., Ziolkowski, D., Lavalle, M., Notarnicola, C., Suresh, G., Antropov, O., Ge, S., Praks, J., Ban, Y., Pottier, E., Mallorquí Franquet, J.J., Duro, J., Engdahl, M.E. 2020. Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 535-552. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2958847>
- Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, Z., Kenkel, B., R Core Team, Benesty, M., Lescarbeau, R., Ziem, A., Scrucca, L. Tang, Y., Candan, C., Hunt, T. 2020. Package caret Classification and Regression Training. En *The Comprehensive R Archive Network (CRAN)*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de <https://cran.r-project.org/web/packages/caret/caret.pdf>
- Liaw, A., Wiener, M. 2020. Package randomForest Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. En *The Comprehensive R Archive Network (CRAN)*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de <https://cran.r-project.org/web/packages/randomForest/randomForest.pdf>
- MAG. 2017a. Boletín Situacional Arroz 2017, En *Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Ecuador*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/boletin_situacional_arroz_2017.pdf
- MAG. 2017b. Boletín Situacional Caña de Azúcar 2017, En *Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de Ecuador*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/boletin_situacional_cania_azucar_2017.pdf
- Mellor, A., Boukir, S., Haywood, A., Jones, S. 2015. Exploring issues of training data imbalance and mislabelling on random forest performance for large area land cover classification using the ensemble margin. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105, 155-168. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.014>
- Mercier, A., Betbeder, J., Rumiano, F., Baudry, J., Gond, V., Blanc, L., Bourgoin, C., Cornu, G., Ciudad, C., Marchamalo, M., Pocard-Chapuis, R., Hubert-Moy, L. 2019. Evaluation of Sentinel-1 and 2 Time Series for Land Cover Classification of Forest-Agriculture Mosaics in Temperate and Tropical Landscapes. *Remote Sensing*, 11, 979. <https://doi.org/10.3390/rs11080979>
- Mestre-Quereda, A., Lopez-Sanchez, J.M., Vicente-Guijalba, F., Jacob, A.W., Engdahl, M.E. 2020. Time Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4070-4084. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3008096>
- Morshed, Md.M., Islam Md.S., Lohano H.D., Shyamsundar, P. 2020. Production externalities of shrimp aquaculture on paddy farming in coastal Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 238, 106213. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106213>
- Navarrete, R. 2000. *Atractivos turísticos naturales de la Reserva Ecológica Manglares Churute*. Guayaquil: CEDEGE, Ministerio del Ambiente, Fundación Natura.
- Orynbaiyzy, A., Gessner, U., Conrad, C. 2019. Crop type classification using a combination of optical and radar remote sensing data: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17), 6553-6595. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1569791>
- Ottinger, M., Clauss, K., Kuenzer, C. 2017. Large-scale assessment of coastal aquaculture ponds with Sentinel-1 time series data. *Remote Sensing*, 9 (5), 440. <https://doi.org/10.3390/rs9050440>
- Palacios, N. 2016. Estudio de factibilidad para producir camarón de la especie *Litopenaeus vannamei* bajo un sistema de producción semi-intensivo en Ecuador. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano Honduras. Proyecto de graduación. Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5812/1/AGN-2016-T035.pdf>
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. En *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. Recuperado el 27 de julio de 2020, de <https://www.R-project.org>
- Rivadeneira-Roura, C., Rivera Rossi, J. 2007. Reserva Ecológica Manglares Churute. In: *ECOLAP y MAE, 2007. Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador*. Quito: ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM.
- Schlund, M., Erasmi, S. 2020. Sentinel-1 time series data for monitoring the phenology of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111814. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111814>
- Small, D. 2011. Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(8), 3081-3093. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>

- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Tran, L., Nunan, L., Redman, R.M., Mohny, L.L., Pantoja, C.R., Fitzsimmons, K., Lightner, D.V. 2013. Determination of the infectious nature of the agent of acute hepatopancreatic necrosis syndrome affecting penaeid shrimp. *Diseases of Aquatic Organisms*, 105, 45-55. <https://doi.org/10.3354/dao02621>
- Yanez, B. 2000. Fase 1-Tomo IV-Propuesta de Manejo. In INEFAN/Fundación Natura, *Plan de Manejo de la Reserva Ecológica Manglares Churute*. Guayaquil: Fundación Natura CEDEGÉ.