

CASO PRÁCTICO

Relación de firmas espectrales para la identificación de bosque seco en imágenes de satélite Sentinel-2, cuenca baja del río Chira, Región Piura

Aldana, C. ^{1*}, Revilla, M. ¹, Gonzales, J. ¹, Saavedra, Y. ¹, Moncada, W. ², Maicelo, J. ^{3,4}

¹Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Perú.

²Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.

³Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Amazonas, Perú.

⁴Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA, Perú.

Resumen: El Fenómeno del Niño, las sequías y el clima cálido influyen de manera directa en el buen estado ecológico de los bosques en la Región Piura. El objetivo es relacionar las firmas espectrales evaluadas en las imágenes de satélite Sentinel-2 con las firmas espectrales medidas con el espectro-radiómetro FieldSpec4, para la identificación de bosque seco en la cuenca baja del río Chira, región Piura, Perú. El preprocesamiento de las imágenes Sentinel-2 correspondientes a los *tiles* 17MNR, 17MPR, 17MMQ, 17MNQ y 17MPQ son unidas en mosaico, remuestreadas y cortadas con el software SNAP. El apilamiento de las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 y 12 genera un *raster* cuyos valores de reflectancia de los píxeles están relacionados a sus longitudes de onda. La clasificación de las zonas con bosque seco se realiza con la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4. La validación de los resultados se realiza aplicando las pruebas no paramétricas de ANOVA y Mann-Whitney-Wilcoxon en cuatro puntos de muestreo. El área de superficie de bosque seco en la cuenca baja del río Chira es 129 113,06 ha, que representa el 3,8 % del área total de bosque seco en el norte del Perú.

Palabras clave: Sentinel-2, bosque seco, cuenca del río Chira, firma espectral, reflectancia.

Spectral signatures for the identification of dry forest using Sentinel-2 images over the Lower Basin of the Chira river, Piura region

Abstract: El Niño phenomenon, droughts and the warm climate directly influence the good ecological state of the forests in the Piura Region. The objective is to relate the spectral signatures evaluated in the Sentinel-2 satellite images with the spectral signatures measured with the FieldSpec4 spectroradiometer, for the identification of dry forest in the lower basin of the Chira River, Piura región. The Sentinel-2 images corresponding to the 17MNR, 17MPR, 17MMQ, 17MNQ and 17MPQ tiles are pre-processed, mosaicked, resampled and cut with the SNAP software. Stacking of bands 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 and 12 generates a raster whose pixel reflectance values are related to their wavelengths. The classification of dry forest areas is done with the spectral signature measured with the FieldSpec4 spectroradiometer. The validation of the results is carried out by applying the non-parametric ANOVA and Mann-Whitney-Wilcoxon tests at four sampling points. The surface area of dry forest in the lower basin of the Chira River is 129 113.06 ha, which represents 3.8% of the total area of dry forest in northern Peru.

Key words: Sentinel-2, dry forest, Chira river basin, spectral signature, reflectance.

To cite this article: Aldana, C., Revilla, M., Gonzales, J., Saavedra, Y., Moncada, W., Maicelo, J. 2020. Spectral signatures for the identification of dry forest using Sentinel-2 images over the Lower Basin of the Chira river, Piura region. *Revista de Teledetección*, 56, 147-156. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.14110>

* Corresponding author: caldana@unf.edu.pe

1. Introducción

El clima cálido, la poca precipitación y la escasez de lluvias en épocas de sequía durante la mayor parte del año, afecta los bosques de la cuenca baja del río Chira en la Región Piura; esta influencia no es ajena al cambio climático en especial El Niño y las sequías, teniendo como consecuencia el incremento de la temperatura superficial del suelo y del aire que impacta en sus ecosistemas, especialmente en los bosques que permanecen secos la mayor parte del año, además de afectar el almacenamiento de agua en la zona alta de la cuenca. Sin embargo, a pesar de la importancia crítica de su protección para garantizar el embalse y suministro de agua para la provincia de Sullana, los pocos esfuerzos han resultado inútiles en la protección de la cuenca (Lindsay, 2019). La complejidad de los problemas ambientales en los ecosistemas de bosques secos del norte del Perú demanda de conocimientos científicos y tecnológicos con alto grado de veracidad, así como el uso de imágenes de satélite, que permitan monitorear y establecer vulnerabilidades y oportunidades características de la zona, como los caprinocultores, que se constituyen como un sector empobrecido y que frecuentemente se les etiqueta como los responsables de la desertificación debido a la ganadería extensiva que practican. Asimismo, existen otras prácticas como la agricultura de secano que toma ventaja de El Niño y que no amenaza la integridad del bosque (Rodríguez y Álvarez, 2005). La vulnerabilidad de El Niño es una fortaleza para los bosques secos, dado que no es solo una cuestión de riesgo climático físico, sino también de condiciones sociales y de salud preexistentes. Más allá de los costos económicos de los daños al entorno construido, los servicios públicos, las industrias y, en general, los medios de vida, además de la pérdida de vidas, todo lo cual exacerba riesgo climático tropical, resulta que es muy beneficioso para la recuperación de los bosques secos en el norte del Perú (Ramírez, 2019). El monitoreo de lluvias propone el uso de información diaria satelital TRMM (Misión de Medición de Lluvias Tropicales) para estimar precipitaciones extremas en áreas no evaluadas donde no hay estaciones meteorológicas. En el norte del Perú, las lluvias no son estacionarias debido al impacto de El Niño, es posible que existan características comunes entre los conjuntos de datos *in situ* y TRMM

mediante análisis de resolución múltiple (MRA) con transformación de wavelet, especialmente durante el período húmedo. Este método permite generar datos de lluvia como una solución a la escasez de datos (Cabrera et al., 2016). Es factible evaluar el cambio de cobertura y uso de la tierra, mediante imágenes del satélite LANDSAT 5, así lo demuestra un estudio de bosque seco realizado en la región Piura, Perú, entre 1999 y 2001, a través de una clasificación supervisada, usando el algoritmo de máxima verosimilitud y comparando con el mapa de bosques secos elaborado por INRENA con interpretación visual de imágenes LANDSAT 5 registradas entre 1986 y 1994. Los resultados mostraron que el 38% del área del bosque seco permaneció sin variación; mientras que, el 13% de dicha área mejoró su condición y el otro 23% de la misma tiende a la reducción de su cobertura (Zorogastúa et al., 2011). El uso de imágenes de satélite Sentinel-2 (S2) es ideal para fines de clasificación de uso de suelo; dichas imágenes cuentan con 13 bandas que proporcionan imágenes radiométricas de alta calidad con una excelente resolución espacial (10 y 20 m). Esta metodología permite cuantificar su mejora con respecto a otras misiones como SPOT. Para hacerlo, se seleccionan cuatro clasificadores (LDA, RF, árboles de decisión, K-NN) aplicándose a dos áreas agrícolas diferentes, una ubicada en Valencia (España) y la otra en Buenos Aires (Argentina). El resultado generó un mapa de uso del suelo a partir del mejor clasificador, de acuerdo con el índice Kappa, que proporciona información científicamente relevante, como el área de cada clase de uso del suelo (Borrás et al., 2017). Otros métodos, proponen el uso de imágenes de radar Sentinel-1 para la detección de cambios de uso de suelo, como el realizado en la Reserva Ecológica Manglares Churute, área natural protegida de 50000 ha, ubicada en el centro occidental de Ecuador, donde se determinó que entre los años 2015 y 2018 hubo un incremento del área ocupada por camaroneras y por caña de azúcar a 1 km de distancia del perímetro. Los mapas de cambios de uso del suelo y de estacionalidad, elaborados a bajo costo, utilizando herramientas de acceso libre y con un margen de error bajo, determinaron que efectivamente las zonas con cultivos de arroz y otros usos como pasto y matorral fueron reemplazados por otras actividades (Vélez, 2019). La clasificación de tipos de coberturas, también se puede

realizar utilizando como método de clasificación supervisado el algoritmo de Mapeo del Angulo Espectral (MAE, o SAM por sus siglas en inglés), comparando las firmas espectrales obtenidas en campo a través de un espectro-radiómetro, como el FieldSpec4 Hi-Res que tiene una resolución espectral 2 nm y proporciona un rendimiento espectral superior en todo el espectro de irradiancia solar desde 350 a 2500 nm (ASD Inc., 2017), con las firmas espectrales de las imágenes de satélite de las parcelas en estudio. Estos datos indican que la utilización de esta técnica supervisada es muy acertada, además de contar con una base de datos de firmas espectrales y otros usos relativos al manejo de cultivos a gran escala con métodos de teledetección a través de imágenes multispectrales e hiperespectrales (Sánchez et al., 2019). La aplicación de firmas espectrales (*enmembers*) en imágenes de satélite como las Sentinel-2, permite reconocer distintos tipos de vegetación y suelo, así como la clasificación de uso de suelo o de especies o variedades forestales como el sapote, el algarrobo, el hualtaco, el palo santo, entre otros. El método que se aplicó, implicó identificar un conjunto de valores de reflectancia con su respectiva

longitud de onda de la firma espectral medida con el espectro-radiómetro, referido a alguna clase, en los píxeles con los mismos valores que conforman la imagen de satélite, para luego mapear la zona en estudio con los mismos parámetros que componen las clases buscadas (Janse et al., 2018).

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

La Cuenca del río Chira, se ubica en la provincia de Sullana de la Región Piura, geográficamente se ubica entre los paralelos $03^{\circ}40'28''$ y $05^{\circ}07'06''$ de la latitud sur, y los meridianos $80^{\circ}46'11''$ y $79^{\circ}07'52''$ de longitud oeste, por el Norte limita con la cuenca del río Puyango, por el Sur con las cuencas de los ríos Piura y Huancabamba, por el Este con las cuencas de Zamora y Chinchipe (Ecuador) y por el Oeste con el Océano Pacífico. La cuenca baja del río Chira se ha seleccionado teniendo en cuenta la altura de la región costa o chala, su altitud mínima es de 0 m s.n.m, su altitud máxima es de 499 m s.n.m y su altitud media es de 74,61 m s.n.m. Tiene un área superficial de 605310,81 ha y un perímetro de 1599586 km, tal como se muestra en

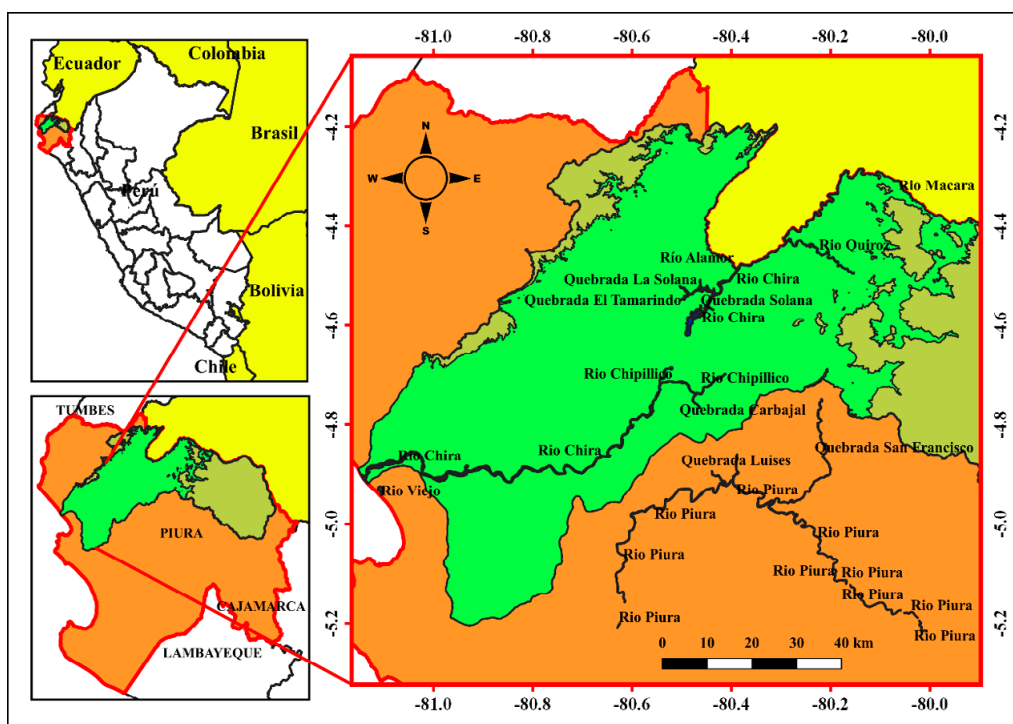


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de la cuenca baja del río Chira, Región Piura.

la Figura 1. Su río principal es el Chira, que nace en la cordillera occidental de los andes a más de 3000 m s.n.m. con el nombre de Catamayo para después recorrer 150 km y unirse con el río Macará donde toma el nombre de río Chira, luego recorre 50 km sirviendo de límite entre Perú y Ecuador hasta encontrarse con el río Alamor continuando en la dirección suroeste en territorio peruano hasta su desembocadura en el mar después de haber recorrido 300 km aproximadamente.

2.2. Procesamiento de las imágenes Sentinel-2 con las firmas espectrales

El método propuesto requiere primero descargar las imágenes de satélite Sentinel-2 del servidor Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA) a través del link: <https://scihub.copernicus.eu/dhus> Las imágenes descargadas que contienen la zona en estudio correspondiente a la cuenca del río Chira, son los tiles 17MNR, 17MPR, 17MMQ, 17MNQ, 17MPQ, los cuales deben ser corregidos, calibrados y unidos en mosaico con el software libre SNAP (*Sentinel Application Platform*). Este software se descarga de la plataforma <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>, que es una caja de herramientas de código abierto para lectura, preprocesamiento, análisis y visualización. Durante el preprocesamiento se realizan los siguientes pasos, primero se importa las imágenes Sentinel-2 al software SNAP para realizar la corrección radiométrica y atmosférica con la herramienta Sen2Cor280 que genera valores de reflectancia entre 0 y 1, correspondientes a los valores de longitud de onda de las 10 bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 y 12, apiladas en un solo ráster de las imágenes Sentinel-2 con tamaños de píxel de 10, 20 y 60 m; asimismo, para un mejor preprocesamiento se remuestra a 10 m de resolución espacial. Posteriormente, las imágenes preprocesadas 17MNR, 17MPR, 17MMQ, 17MNQ, 17MPQ, se unen en mosaico para luego ser recortada con el shape de la cuenca baja del río Chira.

Con el espectro-radiómetro FieldSpec4 se mide la firma espectral del bosque seco correspondiente a una zona de bosque seco con predominancia de overal seco, borrachera seca, otro tipo de vegetación seca, en cuatro puntos de muestra para la validación de la clasificación de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira. La Tabla 1, muestra la ubicación geográfica de los cuatro puntos validación en coordenadas UTM, en donde se han realizado las mediciones de las firmas espectrales con el espectro-radiómetro FieldSpec4.

La identificación de las zonas con bosque seco en la cuenca baja del río Chira mediante la aplicación de la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4, se realiza con el software ENVI clásico, para ello se acude a la pestaña Spectral, donde se escoge la opción *Mapping Methods*, luego se elige la opción *Linear Spectral Unmixing*, se importa la firma espectral del bosque seco y aparece la ventana *Endmember Collection Unmixing*, se escoge la pestaña *Import* para importar la firma espectral y se selecciona los datos de la firmas espectral para posteriormente ejecutarlo. El procedimiento implica, buscar, ubicar o reconocer los valores de reflectancia de cada longitud de onda en cada píxel de la imagen preprocesada para dar lugar a un mapa de clasificación de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira.

2.3. Validación de la cobertura de bosque seco con las firmas espectrales

Para la validación de los valores de reflectancia de la firma espectral obtenidos en el punto de muestreo en la imagen Sentinel-2 (FES2), con los valores de reflectancia de la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4), se aplica las pruebas no paramétricas:

1. Análisis de varianza de un factor (ANOVA), permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de los dos grupos de firmas espectrales

Tabla 1. Ubicación geográfica de los cuatro puntos de validación en coordenadas UTM, en la cuenca baja del río Chira.

Puntos de Validación	Latitud	Longitud	Altitud
Distrito Lancones, Provincia de Sullana	551206	9489270	138
Comunidad Campesina Pampa Larga, Alvarados, Distrito de Suyo, Provincia de Ayabaca	583708	9483993	222
Caserío Macacará del distrito la Huaca, Provincia de Paita	515958	9456561	45
Caserío Pilares del Distrito de Lancones, Provincia de Sullana	556735	9503837	252

son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que las dos medias difieran de forma significativa en cuanto a su valor esperado (Marini y Walczak, 2020). También es conocido como el ratio entre la varianza de las medias de los grupos y el promedio de la varianza dentro de los grupos. Este estadístico sigue una distribución conocida como “F de Fisher-Snedecor”. Si se cumple la hipótesis nula, el estadístico F adquiere el valor de 1 ya que la intervarianza será igual a la intravarianza. Cuanto más difieran las medias de los grupos mayor será la varianza entre medias en comparación al promedio de la varianza dentro de los grupos, obteniéndose valores de F superiores a 1 y por lo tanto menor la probabilidad de que la distribución adquiera valores tan extremos con un menor p -valor. En concreto, S_1^2 es la varianza de la muestra FES2 de tamaño N_1 extraída de una población normal de varianza σ_1^2 y S_2^2 es la varianza de una muestra FEFS4 de tamaño N_2 extraída de una población normal de varianza σ_2^2 , y ambas muestras son independientes, el cociente de la ecuación (1), se distribuye como una variable F con (N_1 y N_2) grados de libertad. En el caso del ANOVA, dado que dos de las condiciones son la normalidad de los grupos y la homocedasticidad de varianza ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$), el valor F se puede obtener dividiendo las dos varianzas calculadas a partir de las muestras de intervarianza e intravarianza (Henson, 2015).

$$F = \frac{S_1^2 / \sigma_1^2}{S_2^2 / \sigma_2^2} \quad (1)$$

2. Prueba U de Mann-Whitney, también llamada de Mann-Whitney-Wilcoxon, identifica una diferencia entre poblaciones con respecto a sus medianas o medias, no requiere que los datos de la muestra sean normales, y es relativamente insensible a la no homogeneidad de la varianza de los datos de la muestra. La hipótesis nula es que las dos poblaciones de las que se han extraído muestras de firmas espectrales tienen medianas o medias iguales. La hipótesis alternativa es que las dos poblaciones de firmas espectrales no tienen medianas o medias iguales. La estadística de prueba $U = \min\{U_1, U_2\}$ de Mann-Whitney escoge el valor mínimo de las ecuaciones 2 y 3, donde U_1 es el número total de observaciones de FES2, que

preceden a las observaciones de FEFS4, y U_2 es el recuento total de las observaciones de FEFS4 que preceden a la FES2; n_1 y n_2 son los tamaños de FES2 y FEFS4, respectivamente; y R_1 y R_2 son las sumas de rango de ambas muestras, respectivamente (Yue & Wang, 2002).

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (2)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (3)$$

El área de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira, se determina a partir del conteo de píxeles clasificados multiplicados por su resolución espacial de 100 m², de esa manera se dispondrá de un mapa de cobertura espacial de bosque seco en la cuenca baja del río Chira en la Región Piura.

3. Resultados y discusión

La cobertura de bosque seco, clasificada en la cuenca baja del río Chira, mediante el uso de firmas espectrales, da como resultado un conteo de 12911306 píxeles que contienen los valores de reflectancia y longitud de onda de la firma espectral de bosque seco utilizada, que multiplicados por la resolución espacial de cada píxel de la imagen de satélite Sentinel-2, que es 100 m², y dividiéndolo entre el valor de 10000 m² equivalente a una hectárea (ha), da como resultado un área de 129113,06 ha de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira representada con los píxeles de color rojo tal como se muestra en la Figura 2.

Los datos del MINAM del 2018, afirman que el área de cobertura total de bosque seco en el norte del Perú es de 3402212 ha, lo cual significa que el área de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira, solo representa el 3,8 % de todos los bosques secos del norte del Perú.

Las firmas espectrales medidas con el espectro-radiómetro FieldSpec4 genera datos de reflectancia entre 0 y 1, con un rango espacial de 1 nm de longitud de onda desde los 350 nm hasta los 2500 nm, lo que significa que se generan curvas continuas correspondiente al barrido de toda la cobertura espacial del suelo conteniendo variedades de vegetación de bosque seco. La Figura 3 muestra las firmas espectrales de bosque seco en los cuatro

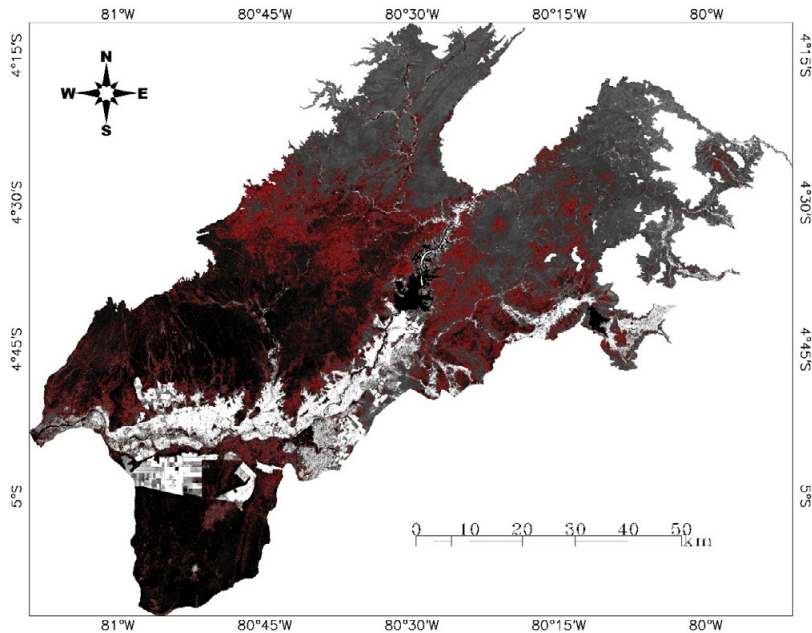


Figura 2. Mapa de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira, Región Piura.

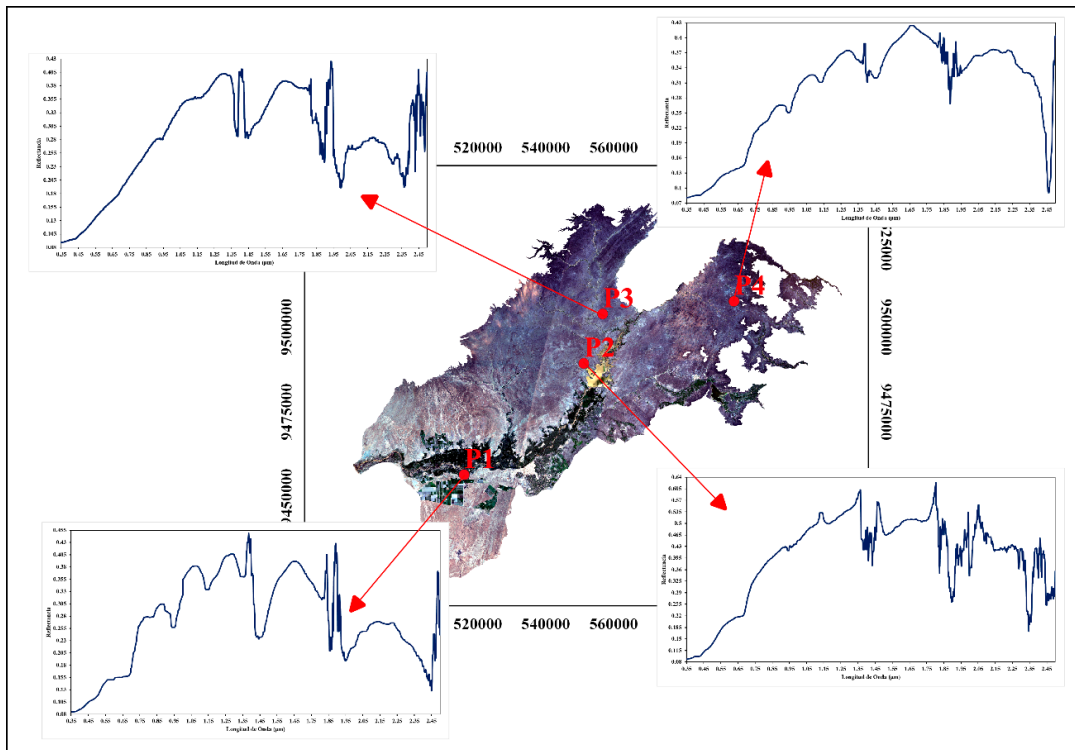


Figura 3. Firmas espectrales de bosque seco en cuatro puntos de validación: P1, suelo con arena y vegetación seca, caserío Macacará del distrito la Huaca, provincia de Paíta. P2, suelo con overal seco, distrito Lancones, provincia de Sullana. P3, suelo con plantas de borrachera seca, caserío Pilares del distrito de Lancones, provincia de Sullana. P4, suelo con vegetación de bosque seco, comunidad campesina Pampa Larga, Alvarados, del distrito de Suyo, provincia de Ayabaca.

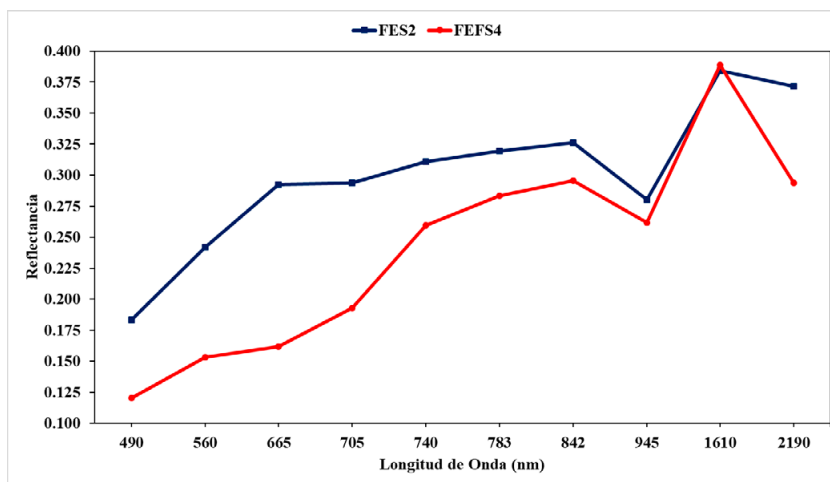


Figura 4. Comparación de la firma espectral de bosque seco medida en la imagen de satélite Sentinel-2 (FES2) y la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4), en el punto de validación “P1” ubicado en el caserío Macacarà del distrito la Huaca, provincia de Paita.

puntos de validación ubicadas en las coordenadas geográficas de la Tabla 1: (a) P1, suelo con arena y vegetación seca, caserío Macacarà del distrito la Huaca, Provincia de Paita, (b) P2, suelo con overall seco, distrito Lancones, Provincia de Sullana, (c) P3, suelo con plantas de borrachera seca, caserío Pilares del distrito de Lancones, provincia de Sullana y (d) P4, suelo con vegetación de bosque seco, comunidad campesina Pampa Larga, Alvarados, del distrito de Suyo, provincia de Ayabaca.

La Tabla 2 detalla los valores de reflectancia de las firmas espectrales de bosque seco evaluadas en la imagen Sentinel-2 (FES2) y medidas con el

espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4) en cuatro puntos de validación en la cuenca baja del río Chira. Las firmas espectrales se evalúan para las 10 bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 y 12 apiladas en un ráster de imagen Sentinel-2 correspondiente a la cuenca baja del río Chira. De igual manera, para cada longitud de onda relativos a las 10 bandas, se toma los valores de reflectancia de las firmas espectrales medidas con el espectro-radiómetro FieldSpec4, los cuales se comparan para evaluar si efectivamente este método de clasificación de bosque seco es certero o no.

En la Figura 4 se compara la firma espectral del suelo con arena y vegetación seca evaluada en la

Tabla 2. Valores de reflectancia de las firmas espectrales de bosque seco evaluadas en la imagen Sentinel-2 (FES2) y medidas con el espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4) en cuatro puntos de validación.

Bandas	Longitud de onda (nm)	Distrito Lancones, Provincia de Sullana		Comunidad Campesina Pampa Larga, Alvarados, Distrito Suyo, Provincia de Ayabaca		Caserío Macacarà del distrito la Huaca, Provincia de Paita		Caserío Pilares del Distrito de Lancones, Provincia de Sullana	
		FES2	FEFS4	FES2	FEFS4	FES2	FEFS4	FES2	FEFS4
B2	490	0,1066	0,1129	0,1476	0,1250	0,1834	0,1204	0,1161	0,1249
B3	560	0,1584	0,1389	0,1764	0,1532	0,2420	0,1533	0,1655	0,1879
B4	665	0,2225	0,1719	0,1826	0,1648	0,2922	0,1616	0,2213	0,2200
B5	705	0,2327	0,1903	0,1990	0,1979	0,2938	0,1927	0,2337	0,2593
B6	740	0,2377	0,2062	0,2546	0,2492	0,3107	0,2594	0,2485	0,3008
B7	783	0,2600	0,2262	0,2703	0,2671	0,3195	0,2833	0,2682	0,3276
B8	842	0,2637	0,2531	0,2864	0,2884	0,3260	0,2957	0,2841	0,3592
B9	945	0,2832	0,2805	0,3049	0,2987	0,2803	0,2618	0,2727	0,3486
B11	1610	0,4323	0,3760	0,2861	0,2814	0,3841	0,3888	0,4260	0,4671
B12	2190	0,3446	0,2939	0,2442	0,2600	0,3716	0,2937	0,3395	0,3554

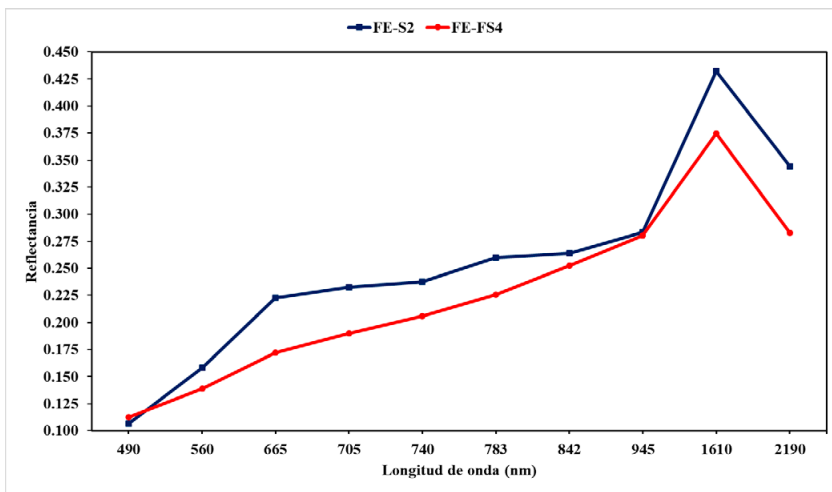


Figura 5. Comparación de la firma espectral de bosque seco medida en la imagen de satélite Sentinel-2 (FE-S2) y la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4), en el punto de validación “P2” ubicado en el distrito de Lancones, provincia de Sullana.

imagen de satélite Sentinel-2 con la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 en el punto de validación “P1” ubicado en el caserío Macacará del distrito la Huaca, Provincia de Paita.

En la Figura 5 se compara la firma espectral del suelo con overall seco evaluada en la imagen de satélite Sentinel-2 con la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 en el punto de validación “P2” ubicado en el distrito Lancones, provincia de Sullana.

En la Figura 6 se compara la firma espectral del suelo con plantas de borrachera seca evaluada en la imagen de satélite Sentinel-2 con la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 en el punto de validación “P3” ubicado en el caserío Pilares del distrito de Lancones, provincia de Sullana.

En la Figura 7 se compara la firma espectral del suelo con vegetación de bosque seco evaluada en la imagen de satélite Sentinel-2 con la firma espectral

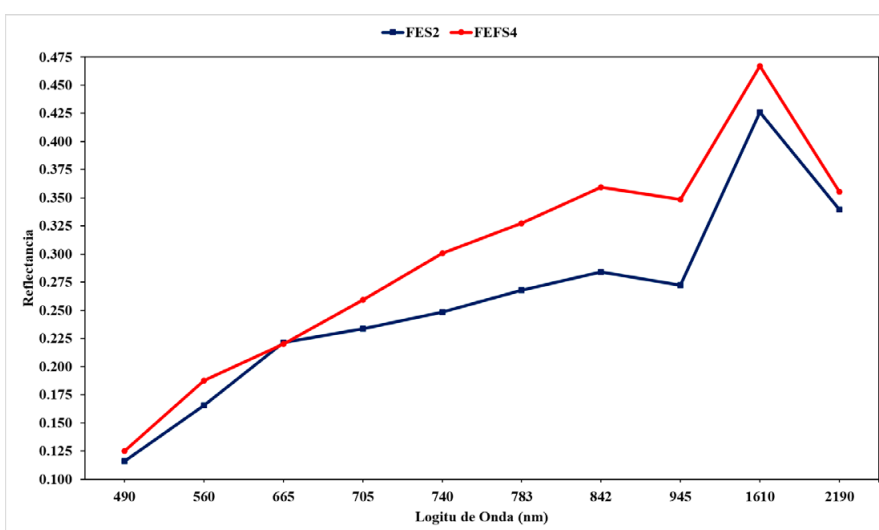


Figura 6. Comparación de la firma espectral de bosque seco medida en la imagen de satélite Sentinel-2 (FE-S2) y la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4), en el punto de validación “P3” ubicado en el caserío Pilares del distrito de Lancones, provincia de Sullana.

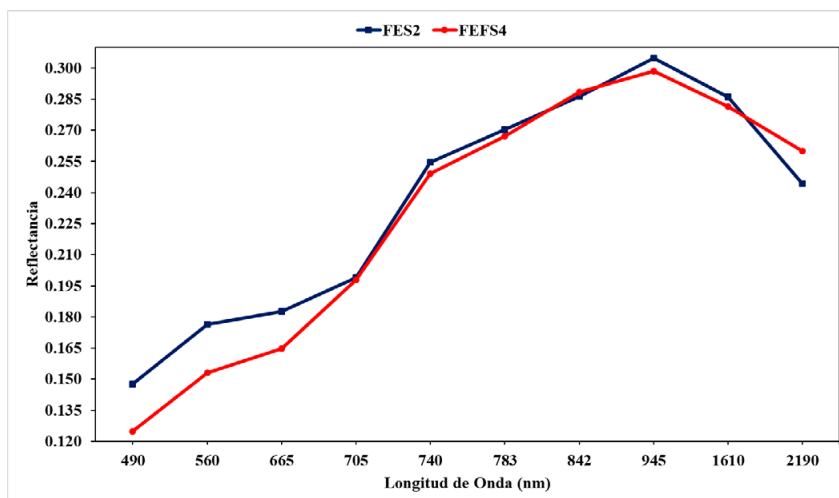


Figura 7. Comparación de la firma espectral de bosque seco medida en la imagen de satélite Sentinel-2 (FE-S2) y la firma espectral medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 (FEFS4), en el punto de validación “P4” ubicado en la comunidad campesina Pampa Larga, Alvarados, del distrito de Suyo, provincia de Ayabaca.

medida con el espectro-radiómetro FieldSpec4 en el punto de validación “P4” ubicado en la comunidad campesina Pampa Larga, Alvarados, del distrito de Suyo, provincia de Ayabaca.

Para validar el resultado se aplicó las pruebas no paramétricas de análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon, ello sugiere plantear las hipótesis nula y alternativa de la siguiente manera:

- H0: No hay diferencia significativa entre los valores de reflectancia de FES2 y FEFS4.
- H1: Si hay diferencia significativa entre los valores de reflectancia de FES2 y FEFS4.

La aplicación de ANOVA a los dos grupos de valores de reflectancia de las firmas espectrales en el punto P1, da un p -valor=0,0799, el cual es mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, lo cual significa que no hay diferencia significativa entre los valores de reflectancia de FES2 y FEFS4. Del mismo modo, la aplicación de la prueba Mann-Whitney-Wilcoxon da un p -valor=0,1616, el cual también es mayor que el nivel de significancia $\alpha=0,05$, confirmando que no hay diferencia significativa entre ambos grupos de firmas espectrales.

Para los dos grupos de valores de reflectancia de las firmas espectrales en el punto P2, la prueba ANOVA da un p -valor=0,4519 el cual es mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, esto indica que

estos dos grupos de datos no tienen diferencias significativas y que ambas firmas espectrales guardan el mismo comportamiento. Asimismo, la prueba Mann-Whitney-Wilcoxon da un p -valor=0,3434 mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, lo que confirma el hecho de que ambas firmas espectrales se comportan de la misma forma.

Para el punto P3, la prueba ANOVA da un p -valor=0,3782 mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, garantizando de que ambos grupos de firmas espectrales no tienen diferencias significativas. De la misma forma, la prueba Mann-Whitney-Wilcoxon da un p -valor=0,3383 que es mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, ello fortalece el hecho de que ambos grupos de datos no tienen diferencias significativas.

La prueba ANOVA aplicada a los dos grupos de datos del punto P4 da un p -valor=0,8040 que es mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, lo que afirma que no hay diferencia significativa entre ambos grupos de valores de reflectancia. Del mismo modo, la prueba Mann-Whitney-Wilcoxon da un p -valor=0,3427 que es mayor al nivel de significancia $\alpha=0,05$, confirma el hecho de que ambos grupos de datos no tienen diferencias significativas.

4. Conclusiones

Las pruebas no paramétricas ANOVA y Mann-Whitney-Wilcoxon, demuestran que ambos grupos

de valores de reflectancia de FES2 y FEFS4 para los puntos de validación P1, P2, P3 y P4 no tienen diferencias significativas, por lo que ambas firmas espectrales tienen el mismo comportamiento; se concluye que, la aplicación de las FEFS4 aplicadas a las imágenes de satélite Sentinel-2, permite caracterizar de manera certera la cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira, lográndose determinar un área de superficie de bosque seco de 129 113,06 ha, que teniendo en cuenta los datos del MINAM del 2018, los cuales indican que el área de cobertura total de bosque seco en el norte del Perú es de 3402212 ha, esto significa que el área de cobertura de bosque seco en la cuenca baja del río Chira, solo representa el 3,8% de todos los bosques secos del norte del Perú.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo financiero de la Unidad de Proyectos de Investigación de la Universidad Nacional de Frontera; Sullana, Piura, Perú. Los autores agradecen al Laboratorio de Teledetección y energías Renovables LABTELER de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; Ayacucho, Perú, por su incondicional apoyo para la toma de firmas espectrales con el espectro-radiómetro FieldSpec4.

Referencias

ASD Inc. 2017. *FieldSpec 4 Hi-Res High Resolution Spectroradiometer*. <https://www.asdi.com/products-and-services/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-hi-res>

Borrás, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., Camps-Valls, G. 2017. Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48, 55. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>

Cabrera, J., Yupanqui, R.T., Rau, P. 2016. Validation of TRMM Daily Precipitation Data for Extreme Events Analysis. The Case of Piura Watershed in Peru. *Procedia Engineering*, 154, 154-157. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.436>

Henson, R.N. 2015. Analysis of Variance (ANOVA). En A.W. Toga (Ed.), *Brain Mapping* (pp. 477-481). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00319-5>

Janse, P.V., Kayte, J.N., Agrawal, R.V., Deshmukh, R.R. 2018. Standard Spectral Reflectance Measurements for ASD FieldSpec Spectroradiometer. *2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*, 729-733. <https://doi.org/10.1109/PDGC.2018.8745808>

Lindsay, A. 2019. Investing upstream: Watershed protection in Piura, Peru. *Environmental Science & Policy*, 96, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.02.005>

Marini, F., Walczak, B. 2020. 1.19-ANOVA-Target Projection (ANOVA-TP). En S. Brown, R. Tauler, & B. Walczak (Eds.), *Comprehensive Chemometrics (Second Edition)* (pp. 495-520). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14578-0>

Ramírez, I.J. 2019. Exploring Tropical Variability and Extremes Impacts on Population Vulnerability in Piura, Peru: The Case of the 1997-98 El Niño. En V. Venugopal, J. Sukhatme, R. Murtugudde, & R. Roca (Eds.), *Tropical Extremes* (pp. 263-297). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809248-4.00008-X>

Rodríguez, A., Álvarez, R. 2005. Uso múltiple del bosque seco del norte del Perú: Análisis del ingreso y autoconsumo. *Zonas Áridas*, 9(1), 131-148. <http://dx.doi.org/10.21704/za.v9i1.573>

Sánchez, J., Jiménez, J.U., Fábrega, J., Serrano, J., Quirós, E.I. 2019. Clasificación Supervisada de Firmas Espectrales de Coberturas Agropecuarias en Panamá Utilizando el Mapeo del Angulo Espectral. *Repositorio Institucional de la Universidad Tecnológica de Panamá*, 7. <https://rida2.utp.ac.pa/handle/123456789/9432>

Vélez, D. 2019. *Análisis multitemporal de una serie de imágenes Sentinel-1 y detección de cambios del uso de suelo para la evaluación de la reserva ecológica Manglares Churute y sus alrededores en Guayas-Ecuador*. Maestría, Universidad Pública de Navarra. <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/33672>

Yue, S., Wang, C. 2002. The influence of serial correlation on the Mann-Whitney test for detecting a shift in median. *Advances in Water Resources*, 25(3), 325-333. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00049-5)

Zorogastúa, P., Quiroz, R., Garatuzza, J. 2011. Evaluación de cambios en la cobertura y uso de la tierra con imágenes de satélite en Piura-Perú. *Ecología Aplicada*, 10(1), 13-22. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v10i1-2.409>