

**EFFECTOS ASOCIADOS AL CAMBIO DEL CAUCE DEL RÍO AMAZONAS EN COLOMBIA, CON ÉNFASIS
EN LA AFECTACIÓN AL TERRITORIO DEL MUNICIPIO DE PUERTO NARIÑO.**



AUTOR

LAURA KATHERINE RODRIGUEZ CEPEDA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

ESPECIALISTA EN GEOMÁTICA

Director:

ING. FREDDY LEÓN REYES M.ED

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA

BOGOTÁ, DICIEMBRE 2022



EFFECTOS ASOCIADOS AL CAMBIO DEL CAUCE DEL RÍO AMAZONAS EN COLOMBIA, CON ÉNFASIS EN LA AFECTACIÓN AL TERRITORIO DEL MUNICIPIO DE PUERTO NARIÑO

EFFECTS ASSOCIATED WITH THE CHANGE IN THE COURSE OF THE AMAZONAS RIVER WITH EMPHASIS ON THE EFFECTS ON THE TERRITORY OF THE MUNICIPALITY OF PUERTO NARIÑO, COLOMBIA.

Laura Katherine Rodríguez Cepeda
3101595
Ing. Catastral y Geodesta

Director trabajo de grado:
Ing. Freddy León Reyes M.Ed

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
DICIEMBRE DE 2022
BOGOTÁ-COLOMBIA**

EFFECTOS ASOCIADOS AL CAMBIO DEL CAUCE DEL RÍO AMAZONAS EN COLOMBIA, CON ÉNFASIS EN LA AFECTACIÓN AL TERRITORIO DEL MUNICIPIO DE PUERTO NARIÑO

EFFECTS ASSOCIATED WITH THE CHANGE IN THE COURSE OF THE AMAZONAS RIVER WITH EMPHASIS ON THE EFFECTS ON THE TERRITORY OF THE MUNICIPALITY OF PUERTO NARIÑO, COLOMBIA.

Laura Katherine Rodríguez Cepeda
Ingeniera Catastral y Geodesta.
Universidad Militar Nueva Granada.
Bogotá, Colombia
est.laurak.rodriagu1@unimilitar.edu.co

RESUMEN

La presente investigación busca identificar el cambio del cauce del Río Amazonas entre los años 2015 a 2022 y los efectos del mismo mediante análisis y modelamiento de la dinámica del afluente, no solo sobre las riveras y llanuras aledañas, sino especialmente sobre el Municipio de Puerto Nariño. El municipio según lo documentado, desde el año 2020 se encuentra expuesto de forma directa al cauce, y los análisis conseguidos en la presente investigación, aportan a estudios en gestión de riesgos y planes de ordenamiento territorial que realicen planes de prevención sobre las áreas identificadas las cuales de conformidad con el comportamiento natural del Río, a futuro serán zonas erosionadas, que presenten constantes desprendimientos de tierra y desestabilicen árboles de gran magnitud que representen un peligro para las poblaciones aledañas. La presente investigación hace uso de los Sistemas de Información Geográfica aplicados a imágenes satelitales Landsat 8 con nivel de procesamiento 2 y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado MNDWI, cuya clasificación de cuerpos de agua sobre cualquier otra cobertura es más efectiva que la clasificación que se logra con el índice NDWI, lo que facilitó la identificación del cauce para el modelamiento de la dinámica en los años propuestos.

Palabras Clave: MNDWI, Análisis Multitemporal, Sistemas de Información Geográfica, Río Amazonas, Puerto Nariño, Landsat 8.

ABSTRACT

This research seeks to identify the change of the Amazon River channel between 2015 and 2022 and its effects through analysis and modeling of the dynamics of the water body, on the banks and surrounding plains, with emphasis on the municipality of Puerto Nariño. The municipality, as documented, has been directly exposed to the riverbed

since 2020 due to the loss of a natural barrier, and the analyses carried out in this research contribute to risk management studies and land use plans that carry out prevention plans for the identified areas which, according to the natural behavior of the river, will be eroded areas in the future, with constant landslides and destabilized trees of great magnitude that represent a danger for the surrounding populations. The present research makes use of Geographic Information Systems applied to Landsat 8 satellite images with processing level 2 and the Modified Normalized Difference Water Index MNDWI, whose classification of water bodies over any other coverage is more effective than the classification achieved with the NDWI index, which facilitated the identification of the channel for the modeling of the dynamics in the proposed years

Keywords: MNDWI, Multitemporal Analysis, Geographic Information Systems , Puerto Nariño, Landsat 8.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país diverso en toda su extensión y es afortunado por la cantidad de recursos hídricos que posee, al extremo sur del país, el departamento del Amazonas reconocido por hacer parte del gran pulmón del mundo, limita y se conecta con los países de Perú y Brasil gracias al Río Amazonas, cuya cuenca es la más grande del mundo con cerca de 230.000 m³ de agua por segundo, correspondiente al 20% del agua dulce en la superficie terrestre [1]. La principal característica de este territorio es poseer una de las mayores biodiversidades del planeta y el segundo río más largo y caudaloso del planeta [2] que atraviesa entre otros, a estos tres países conectando no solo sus fronteras geográficas sino también sus actividades socioculturales y sus relaciones comerciales y económicas. La importancia del Río Amazonas no solo radica en ser el cauce que atraviesa a una de las regiones reguladoras del oxígeno en el mundo, sino también en ser la conexión entre estos tres (3) países y el sustento de los cientos de familias y comunidades que habitan en torno a su cauce.

Los cauces de los ríos se encuentran en una constante alteración debido a la formación de diversos meandros tras los incrementos y el descenso de las aguas ciclo tras ciclo y año tras año, formación que se facilita en el Río Amazonas debido a la planicie de su llanura alledaña, pero que también llena de nutrientes estos suelos. Los meandros son el resultado de los procesos fluviales y del patrón del curso de cada río, patrón determinado por factores como la cantidad y la carga de sedimentos arrastrados por el río y su descarga, esta dinámica fluvial tiene un extenso efecto sobre el medio ambiente biótico y abiótico [3]. Frente a la dinámica fluvial y las temporadas de lluvia y sequía, las comunidades han aprendido a ser resilientes y han adaptado sus vidas, sus desplazamientos, construcciones de vivienda y todas sus actividades económicas y culturales, considerando las inundaciones del río, sin embargo, la actuación del río sobre la superficie terrestre es un efecto inevitable además de requerir de una demarcación de zona de conservación, que necesita la atención y actuación de las autoridades territoriales para que no represente un riesgo para las poblaciones alledañas al río y para que se proteja el afluente[4].

Los desplazamientos en los cauces de los ríos afectan no solo el espacio físico de los habitantes, su clima y su vegetación, sino también sus actividades socioculturales y

sus formas de vida a pesar de la capacidad de resiliencia de las poblaciones, por lo cual, el propósito de la presente investigación radica en la identificación de los efectos asociados al cambio de cauce del Río Amazonas en el territorio a lo largo de aproximadamente 180 km, iniciando el análisis cerca a la población de Tabatinga en Brasil, pasando por toda la frontera colombiana y comunidades como las establecidas en Leticia, Macedonia, Mocagua y Puerto Nariño, hasta Chimbote, comunidad del Perú.

El efecto del cambio de cauce sobre el espacio físico en esta investigación, tiene mayor énfasis en el municipio de Puerto Nariño, un municipio que ha perdido una cantidad de territorio considerable al paso del río y en la cual año tras año sus habitantes han tenido que desarrollar estrategias de reconstrucción y diseño de caminos y puentes alternos para no ver tan afectadas sus actividades socioculturales y económicas en temporada de aguas altas, en la cual el Río Loretoyacu, afluente del Río Amazonas, inunda la parte baja del municipio, aquella en la que se encuentra ubicado el comercio, las instituciones gubernamentales y el puerto [5]. El municipio, tras la temporada de aguas altas del año 2020, quedó totalmente expuesto al cauce del Río Amazonas, después de que este arrasara con las Isla Zancudo, ubicada justo en frente del municipio y que lo deja a merced de la fuerza de todo el caudal del Río Amazonas [6].

Cabe resaltar, que los ciclos de lluvia que hacen que el río incremente su nivel de forma considerable, al finalizar, dejan a la vista un riesgo para las poblaciones que pocas autoridades tienen en cuenta, las diversas comunidades que habitan entorno al cauce del río se ven expuestas cada año en temporada de aguas bajas a la caída de los árboles de gran magnitud que se encuentran al borde del río y cuyas raíces quedan al descubierto cuando bajan los niveles del agua e incluso debido a los movimientos en masa por el nivel de encharcamiento de los suelos después de las aguas altas, lo cual hace que estos árboles queden en riesgo de caída en las orillas del río, por donde transitan los habitantes de la región. Esta problemática es expuesta en el desarrollo de la presente investigación, con el fin de aportar este conocimiento a las autoridades territoriales competentes, para que se establezcan estrategias de protección y prevención que tengan en cuenta este riesgo, en el marco del desarrollo del Plan de Gestión de Riesgos del municipio de Puerto Nariño y del departamento en general.

Los procesos de análisis de la presente investigación giran en torno al uso y la implementación de la información geográfica y al aprovechamiento de imágenes satelitales y el procesamiento de las mismas que permiten un sinnúmero de estudios en torno a vegetación, cuerpos de agua, cambios en la superficie territorial, entre otros, estudios medioambientales que proporcionan información espacial relevante para hacer seguimiento a diversos fenómenos de importancia para el hombre [7], imágenes y estudios que junto con programas de software que aportan a los Sistemas de Información Geográfica y que permiten la fusión de diversas herramientas de análisis, potencializan el tipo de estudios que permitan a las entidades y gobiernos territoriales conocer su espacio físico, organizarlo y tomar decisiones sobre él de la manera más armónica posible, respetando las leyes naturales pero garantizando una vida digna a sus poblaciones. Con este propósito, se considera que los análisis desarrollados en esta investigación, aportan al ordenamiento territorial y al reconocimiento de los

cambios y los riesgos que se han presentado a lo largo de los años y que se seguirán presentando sobre el cauce del Río Amazonas en su paso por Colombia, como efecto del movimiento y la transformación natural de uno de los cuerpos de agua dulce más importantes del mundo.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Área de estudio

Se determina como área de estudio el extremo sur del trapecio amazónico, donde la amazonia colombiana se une con Perú y Brasil por medio del Río Amazonas. El polígono establecido como área de estudio cubre toda la frontera colombiana y la fracción del cauce del Río Amazonas correspondiente, abarcando aproximadamente 542.440 Hectáreas de territorio colombo-peruano y parte de Brasil, entre las que se encuentran las poblaciones colombianas de Leticia y Puerto Nariño, Chimbote, Cabalococha y Bellavista en Perú y Tabatinga en Brasil; el área seleccionada comprende aproximadamente 129.13 km de longitud del cauce del Río Amazonas de los cuales aprox. 110 km pertenecen a Colombia [8].

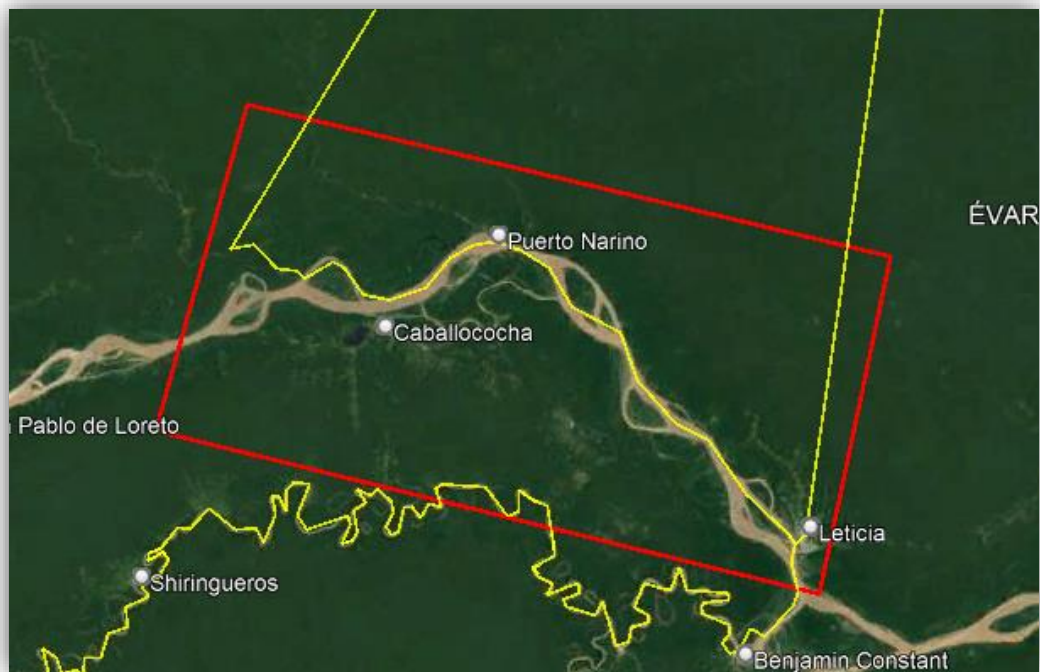


Ilustración 1 Área de Estudio Fuente: Google Earth

1.2 SELECCIÓN Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

El análisis de los efectos asociados al cambio del cauce del Río Amazonas, se hace desarrollando un estudio con imágenes satelitales multiespectrales del sistema Landsat 8 que abarcan una ventana de tiempo de 07 años desde el año 2015 hasta el año 2022.

La selección de las imágenes a utilizar en la presente investigación, se hace teniendo en cuenta los siguientes criterios:

En primer lugar, se determina que la fecha de adquisición de la imagen estuviese entre los meses de Junio a Octubre. Todas las imágenes seleccionadas corresponden a una misma temporada de búsqueda puesto que para el Río Amazonas se registran temporada de aguas en descenso entre los meses Junio y Julio y aguas bajas en Agosto y Octubre, los meses en los que se presenta el caudal más bajo en el área de estudio seleccionada y por ende se facilita encontrar imágenes sin mayor porcentaje de nubosidad, esto con el fin de identificar los efectos de las épocas de aguas en ascenso (Noviembre-Febrero) y de aguas altas (marzo-mayo) [9].

En segundo lugar, que las imágenes que cumplen con el rango de fechas establecido, no tuviesen en la zona de interés un porcentaje de nubosidad que afectara la visualización del cauce del río y en especial, del Municipio de Puerto Nariño.

La búsqueda y descarga de las imágenes se realiza en la plataforma Earth Explorer desarrollada y alimentada por el por el U.S. Geological Survey (USGS), quienes se hacen cargo de la producción, archivo y distribución de los datos de Landsat desde 1972 [10].

La plataforma permite cargar el archivo del área de interés (AOI por sus siglas en inglés) en formato KMZ o shape para hacer más diligente la búsqueda de las imágenes, la cual depende también de los demás criterios como porcentaje de nubosidad, fechas, satélites, colección, nivel de procesamiento, entre otros, que se establezcan para la búsqueda.

Las imágenes seleccionadas hacen parte del sistema Landsat 8 el cual fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y se encuentran ubicadas según el Sistema de Referencia Mundial-2 (WRS-2), sistema Path/Row en el Path 004 y Row 063, pertenecen a la colección 2 con nivel de procesamiento 2. Landsat 8 cuenta con una órbita sincrónica con el Sol a una altitud de 705 km, cubre el globo cada 16 días (excepto las latitudes polares más altas) y realiza un giro completo a la Tierra cada 98.9 minutos [11].

Con dos sensores en funcionamiento, las imágenes Landsat 8 cuentan con 9 bandas espectrales incluyendo una pancromática, tomadas por el sensor OLI y dos bandas del Sensor Infrarrojo Térmico ó TIRS [11].

Las características de las bandas de las imágenes multiespectrales tomadas por el satélite Landsat 8 [11] (Ver tabla No. 1), se describen a continuación:

Tabla 1 Características de Bandas Landsat 8

Bandas			
Sensor	Banda	Long. De Onda (μm)	Resolución
OLI	1. Aerosol costero	0.43 – 0.45	30 m
OLI	2. Azul	0.45 – 0.51	30 m
OLI	3. Verde	0.53 – 0.59	30 m
OLI	4. Rojo	0.63 – 0.67	30 m
OLI	5. Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30 m
OLI	6. Infrarroja de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30 m
OLI	7. Infrarroja de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30 m
OLI	8. Pancromática	0.50 – 0.68	15 m
OLI	9. Cirrus	1.36 – 1.38	30 m
TIRS	10. TIRS 1	10.60 – 11.19	30 (100) m
TIRS	11. TIRS 2	11.50 – 12.51	30 (100) m

Fuente: EOS Data Analytics.

Las imágenes descargadas para la presente investigación cuentan con nivel 2 de procesamiento, es decir, con corrección radiométrica, atmosférica, valores de reflectancia a nivel de superficie y temperatura de superficie en grados kelvin, capturadas con sensores OLI/TIRS. Se describen a continuación los detalles de las imágenes obtenidas:

Tabla 2 Características Imágenes en Estudio

Imagen	Resolución Espacial	Fecha Captura		
		Día	Mes	Año
Landsat 8	30 m – 15 m	20	08	2015
Landsat 8	30 m – 15 m	18	09	2020
Landsat 8	30 m – 15 m	23	08	2022

Las imágenes fueron descargadas acorde al área de estudio establecida para que en los procesamientos ocupen menos espacio, a continuación, se muestran las imágenes seleccionadas, en combinación RGB 5,6,4 comúnmente utilizada para análisis de vegetación y resaltar cuerpos hídricos.

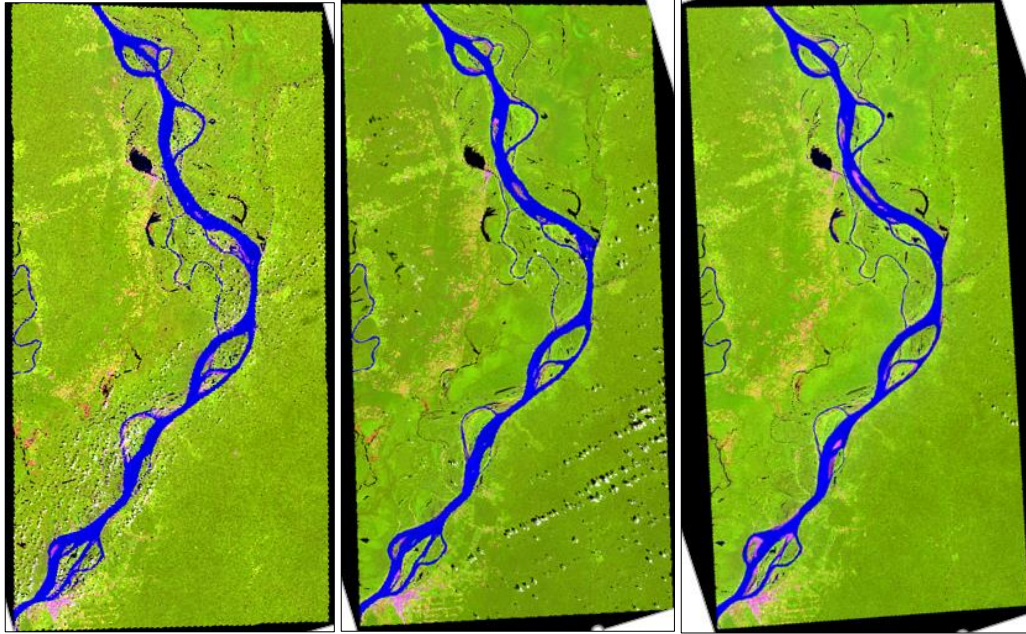


Ilustración 2 Imágenes Landsat 8 Área de estudio, 2015 (Izq.), 2020 (Der.), 2022 (Inferior), en combinación RGB 6,5,4.

1.3 ETAPA DE DISEÑO

1.3.1 PRE-PROCESAMIENTOS

Los datos registrados por los sensores de los diferentes satélites pueden presentar errores en la geometría y en la captación de los niveles digitales, el procesamiento de las imágenes satelitales requiere de procesos previos que contienen técnicas de corrección, clasificación y transformación de la información inicial de las imágenes para obtener información nueva y de calidad, por ello se requieren correcciones como las radiométricas y geométricas con las que se logra eliminar anomalías de localización y de Niveles Digitales en los píxeles. Las imágenes Landsat 8 ya cuentan con esta corrección por lo que se omite su realización en la presente investigación [12].

Actualmente es posible encontrar en el aplicativo del USGS imágenes Landsat con un nivel 2 de procesamiento, en este nivel de procesamiento los datos del sistema Landsat 8 y 9 al ser descargados contienen datos de Reflectancia superficial (RS) derivada de los datos del Landsat 8-9 colección 2 Nivel 1 Operational Land Imager (OLI), así como temperatura de la superficie, derivada del procesamiento de los datos de la banda 10 del sensor térmico infrarrojo o TIRS por sus siglas en inglés, que pertenece a la colección 2 de Landsat 8, se encuentran incluso las bandas intermedias que fueron empleadas en el cálculo de los productos y máscaras de evaluación de la calidad (QA) que indican la utilidad de los datos.

Los productos científicos de Reflectancia Superficial (SR) son generados a partir del Código de Reflectancia de la Superficie Terrestre (LaSRC) versión 1.5.0. modificado

por el USGS. Genera entonces productos con Reflectancia y temperatura del brillo de la parte superior de la atmósfera o TOA, utilizando los parámetros de calibración de los metadatos de cada imagen.

Estos productos solo se generan a partir de escenas que han sido procesadas a nivel 1 (T1) o nivel 2 (T2) y están disponibles entre 15 y 17 días después de la adquisición de los datos. Las imágenes Landsat 8 están disponibles desde el 18 de marzo de 2013 al presente.

La banda 8 (banda pancromática) del sistema Landsat 8-9 OLI, no es procesada para la Atmósfera o Reflectancia Superficial y cabe resaltar que los productos de Reflectancia Superficial en latitudes mayor a 65° no son del todo fiables y precisan de mayor análisis para su uso. [10]

1.3.2 TRANSFORMACIÓN A VALORES DE REFLECTANCIA

En el nivel de procesamiento en que fueron descargadas las imágenes objeto de estudio, al ser cargados en los distintos software de procesamiento, las bandas poseen aún valores de Niveles digitales, para obtener los valores de reflectancia que fueron previamente calculados por su nivel de procesamiento, es necesario multiplicar cada banda por el factor de escala y sumar el desplazamiento correspondiente, de conformidad con las indicaciones de la Guía de productos científicos de nivel 2 (L2SP) del USGS [10]:

Tabla 3 Especificaciones de bandas Productos (L2SP) Landsat 8-9

Band Designation	Band Name	Data Type	Units	Data Range	Valid Range	Fill Value	Multiplicative Scale Factor	Additive Offset
ProductID_SR_B1	Band 1 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B2	Band 2 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B3	Band 3 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B4	Band 4 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B5	Band 5 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B6	Band 6 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B7	Band 7 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_ST_B10	Band 10 ST	UINT16	Kelvin	1 - 65535	293 - 61440	0	0.00341802	149

Fuente: Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide

Una vez realizada la operación en cada banda, la cual se sistematiza con modelos construidos en Arcgis Pro, se obtienen las bandas con sus valores correspondientes de reflectancia superficial, valores en decimales que le dan mayor precisión a los resultados de los índices espectrales en los que son utilizadas las bandas multiespectrales.

1.3.3 CÁLCULO DEL ÍNDICE MNDWI

Con valores de reflectancia ya calculados en las bandas de las imágenes seleccionadas, fue calculado en el software Arcgis Pro el índice propuesto de agua normalizada modificado o MNDWI por sus siglas en inglés [13], para las imágenes de los tres años en estudio, el cual tiene como objetivo realzar y delinear automáticamente

y con más certeza los cuerpos de agua, con la misma fórmula utilizada en el índice de agua de diferencia normalizada o NDWI sustituyendo la banda del infrarrojo cercano por la banda del infrarrojo medio, esto, con el fin de mejorar los resultados en zonas en las que hay presencia de construcciones, las cuales suelen adquirir valores positivos en la utilización del índice NDWI [14]. El principio de éstos índices se basa en que la reflectancia de agua en el canal infrarrojo es mucho menor que la reflectancia de otros tipos de coberturas [15].

La operación entre bandas multispectrales para la obtención del MNDWI se hace con la herramienta Ráster Calculator de ArcgisPro y de acuerdo con la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que en las imágenes Landsat 8, la banda verde corresponde a la banda No.3 y la banda Infrarrojo medio corresponde a la banda No. 6:

$$MNDWI = \frac{\text{Banda Verde} - \text{Infrarrojo Medio}}{\text{Banda Verde} + \text{Infrarrojo Medio}}$$

La banda verde representa el valor de la reflectancia en la banda correspondiente a la longitud de onda en el rango 0.53 a 0.59 μm y la banda Infrarrojo medio o IRM que corresponde a la longitud de onda en el rango 1.57 a 1.65 μm . El umbral de valores del índice debido a su definición matemática se encuentra en un rango entre -1 y 1, donde los valores superiores a 1 corresponden a cuerpos de agua [15].

En la aplicación inicial del NDWI, se identificó que el índice no consideraba algunos segmentos del cauce del río, los cuales, sí se identifican fácilmente en la imagen producto del índice MNDWI, además, en este índice modificado, al presentar valores mucho más extremos y más brillantes, la diferencia en tonalidades entre cuerpos de agua y suelo es mucho más notable, es decir, la discriminación es mayor, lo que permite confirmar que el MNDWI con su banda infrarrojo intermedio si hace una mejor clasificación de cuerpos de agua. Con el índice MNDWI es posible identificar los lugares de mayor acumulación de sedimentos a lo largo del cauce, lo cual se evidencia en tonalidades un poco más opacas a comparación del brillo en general de todo el cuerpo hídrico resaltado por el MNDWI.

La presente investigación emplea el índice MNDWI anteriormente descrito, con el fin de identificar con eficacia los límites que alcanza el cauce del Río Amazonas en su paso por la frontera colombiana, durante sus épocas secas para identificar así, el territorio que se ha perdido tras el paso de las temporadas de lluvia en los años seleccionados para el estudio, las nuevas áreas inundables en el cauce del río.

1.3.4 RECLASIFICACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE RESULTADOS DEL ÍNDICE MNDWI

La reclasificación de los valores obtenidos en el cálculo del índice normalizado de agua modificado MNDWI, se hace mediante la herramienta de reclasificación ráster, que

permite establecer la cantidad de valores y rangos de clasificación que se desea, para el caso, se hace una reclasificación de los valores del índice en valores positivos que representan los cuerpos de agua y valores negativos que representan cualquier otra cobertura en la escena como suelos, cobertura vegetal, construcciones, entre otros. Mediante la herramienta Extract By Attributes las áreas identificadas como agua en el área de estudio se extraen y son transformadas a formato vector, con geometría de polígonos mediante la herramienta Raster To Polygon, para facilitar así la comparación y el cálculo de áreas entre los años seleccionados para la investigación.

Todo el proceso es aplicado a las tres imágenes obtenidas del cálculo del índice MNDWI, mediante un modelo que permite automatizar el proceso de reclasificación, extracción, transformación y cálculo de áreas de los cuerpos de agua de la escena.

Con los polígonos correspondientes al cauce del río en los diferentes años es posible hacer los análisis de contracción - expansión del cuerpo de agua que se presentan a lo largo del cauce del río en los aproximadamente 129.13 km de longitud del área de estudio, en los años 2015-2020 y 2020-2022.

Teniendo en cuenta que la contracción hace referencia a la pérdida del área del cuerpo de agua comparada con el área inicial y que la expansión corresponde al territorio que gana o sobre el cual el cauce amplía su recorrido comparadas dos épocas distintas de tiempo, se aplica la herramienta ERASE para identificar estos procesos en los años seleccionados para la presente investigación [16].

1.3.5 ANÁLISIS DEL TRAZADO DEL SISTEMA FLUVIAL

Se hace referencia a la trayectoria del río en su recorrido, en el cual se presenta la formación de meandros, arcos formados a partir del accionar del caudal de un río los cuales pueden presentarse con mayor frecuencia en cauces de ríos cuyas llanuras aluviales presentan bajas pendientes. Los meandros presentan zonas cóncavas, en las cuales, por la fuerza del caudal, mayor velocidad del agua y el trazado del río se genera mayor erosión, causando meandros abandonados que se separan del río o modifican su cauce, y se encuentran también zonas convexas, donde los sedimentos arrastrados por el río suelen depositarse y conformar islas a lo largo del cauce [17].

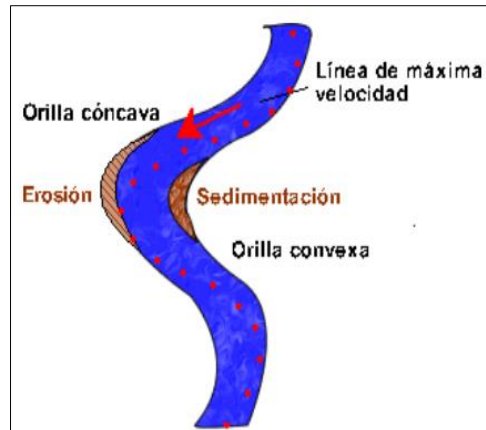


Ilustración 3 Partes de un Meandro Fuente: Sistema Morfoclimático de Zonas templadas [17].

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.1 APLICACIÓN ÍNDICE NORMALIZADO DE AGUA MODIFICADO - MNDWI

Al comparar los índices NDWI y MNDWI se confirman las ventajas que según [14] tiene el MNDWI sobre el NDWI original, puesto que al agua son asignados valores positivos más altos, debido a que la banda del infrarrojo medio a diferencia de la banda Infrarrojo cercano absorbe mucha más energía en los cuerpos de agua que en las demás coberturas, incluyendo construcciones, lo que genera mayor contraste en toda la escena y genera mayor detalle de la forma y fronteras de los cuerpos de agua.

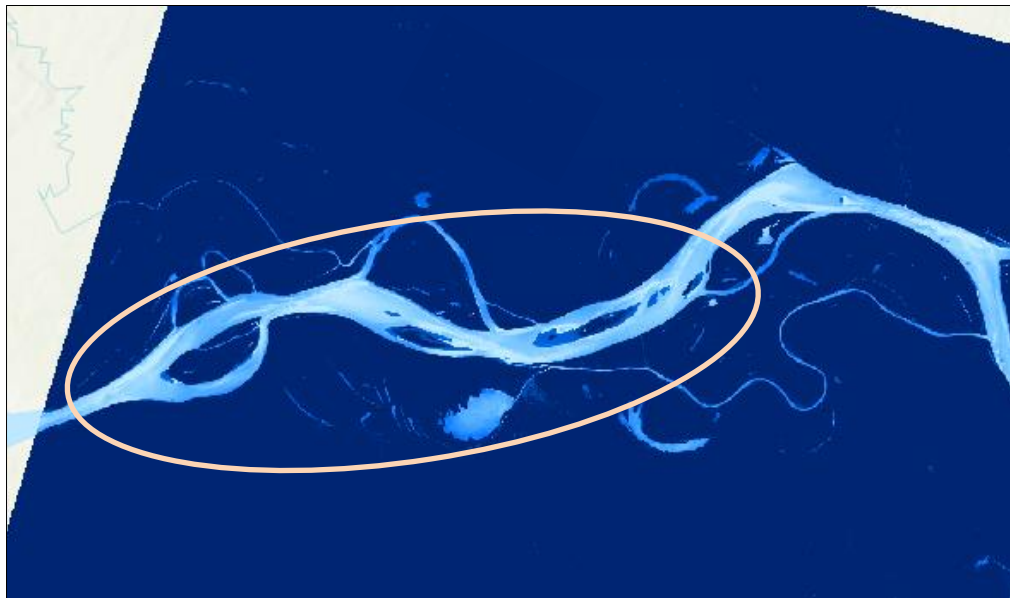


Ilustración 4 Fragmento del Cauce del Río Amazonas con índice NDWI aplicado.

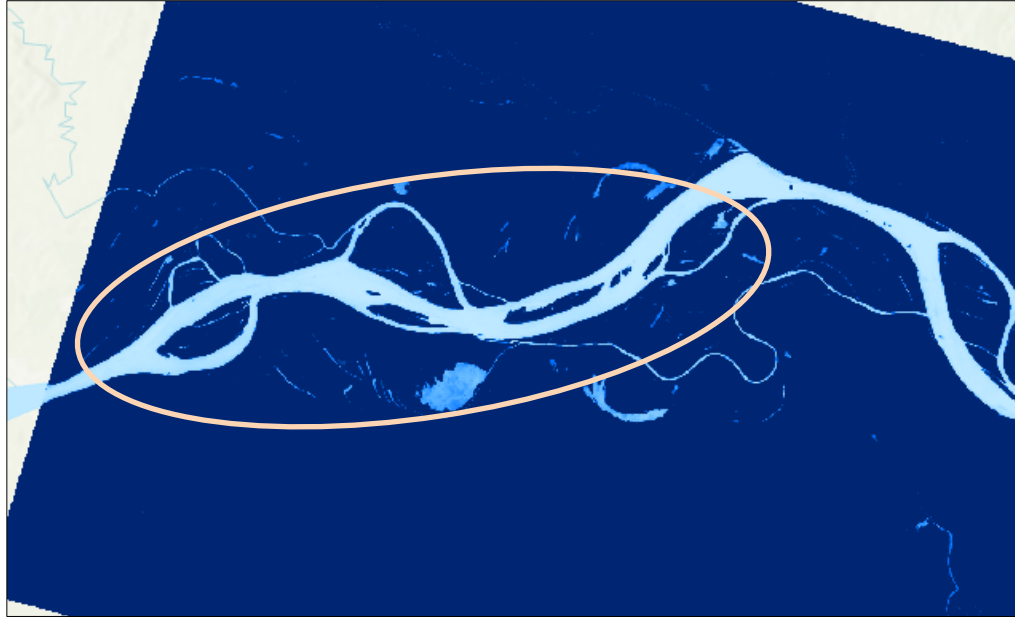


Ilustración 5 Fragmento del Cauce del Río Amazonas con índice MNDWI aplicado

Una vez aplicado el índice normalizado de agua modificado MNDWI para los años seleccionados en la presente investigación, los valores obtenidos en las imágenes fueron reclasificados en rangos con valores entre cero y 1 correspondientes a los cuerpos de agua y valores entre -1 y 0 que representan las demás coberturas encontradas en la escena, la información fue exportada a formato vector con el fin de cuantificar los resultados en cuanto al área que al paso de los años ha ido perdiendo el territorio colombiano debido al cambio del cauce del Río Amazonas. En las siguientes imágenes es posible identificar los polígonos extraídos de toda la zona de estudio, de los años 2015 (costado izquierdo), 2020 (medio) y 2022 (costado derecho), que evidencian los cambios de cauce, expansión y contracción del río.

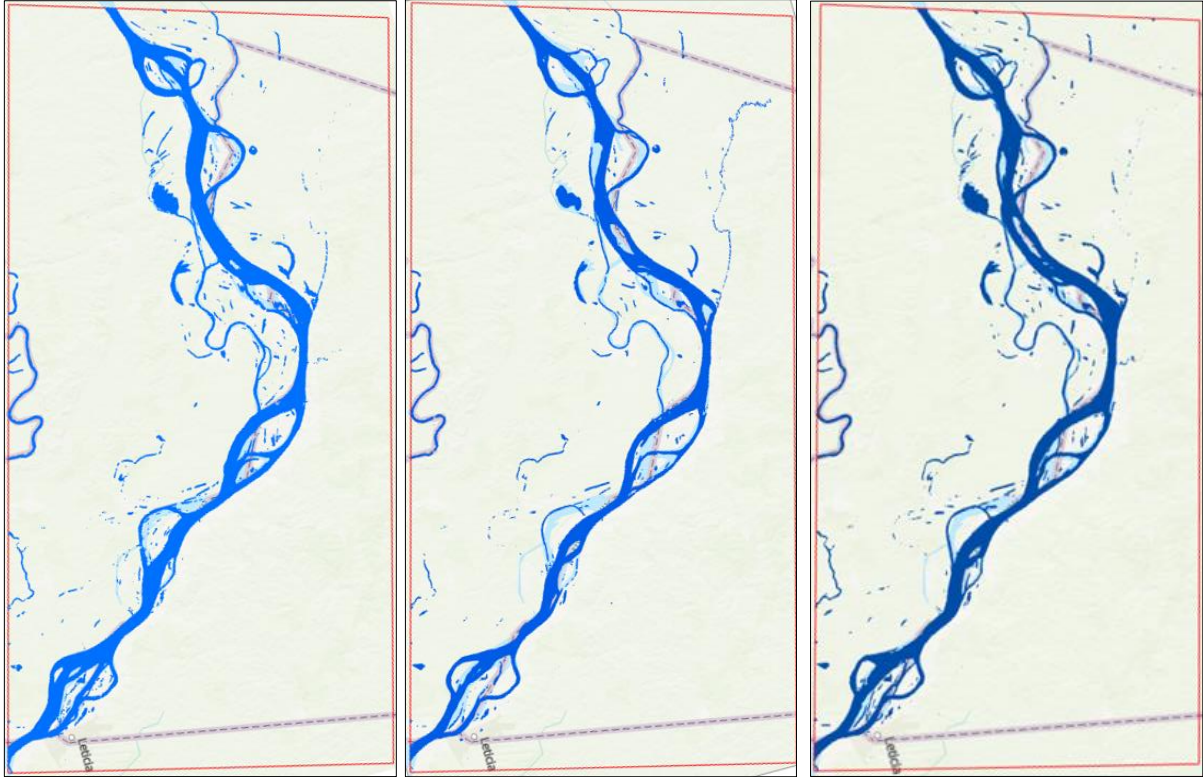
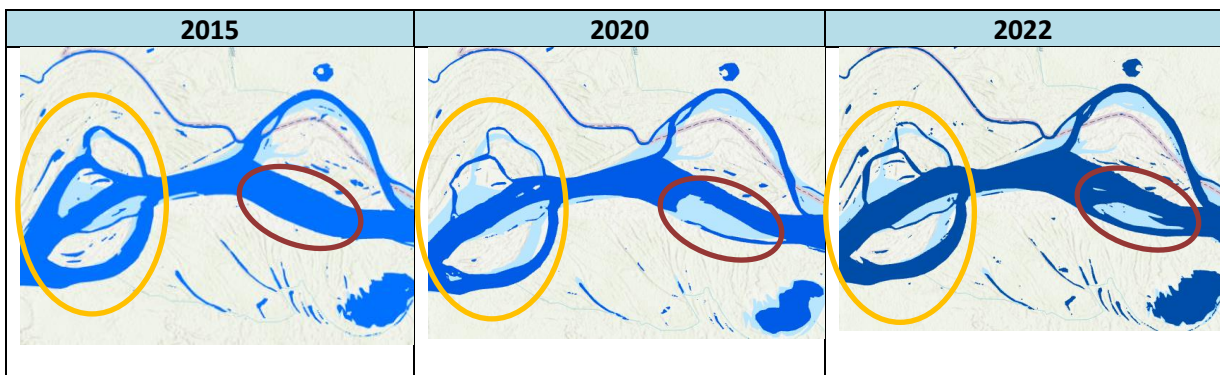
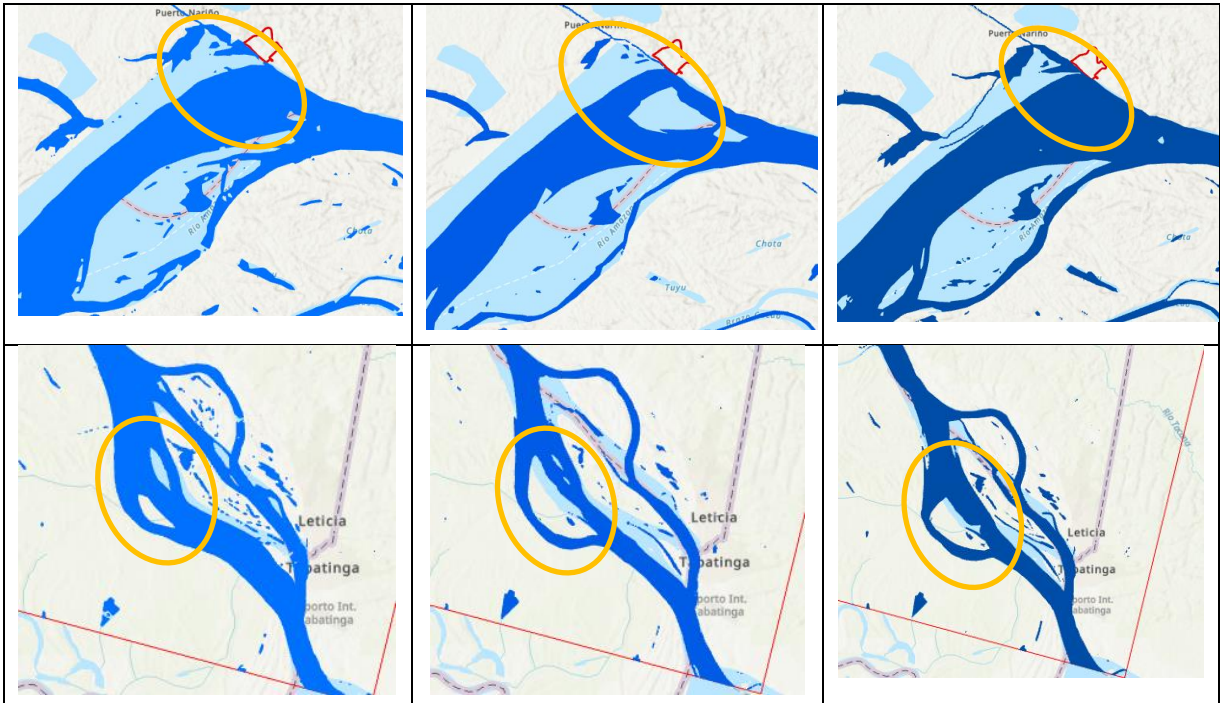


Ilustración 6 Cauce del Río Amazonas en Colombia Años 2015,2020 y 2022

Con los polígonos obtenidos en la reclasificación de los valores derivados del cálculo del índice NDWI, es posible hacer una primera identificación de las zonas que presentan cambios más representativos en el cauce, algunas de ellas se muestran a continuación:

Tabla 4 Identificación de grandes cambios en el cauce tras calcular índice MNDWI





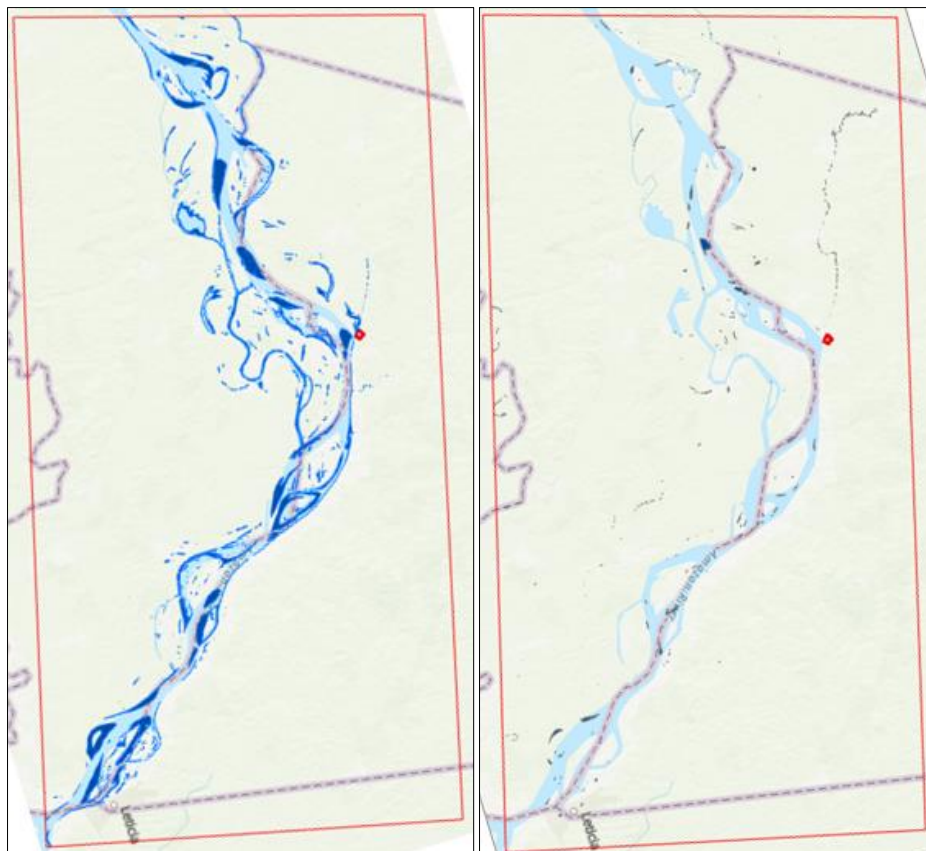
En general, gracias a la individualización de los cuerpos de agua en las imágenes obtenidas en el modelamiento de la dinámica del afluente, es posible identificar la formación de diferentes islas y el accionar de los meandros presentes en el cauce del río, sus transformaciones y la caracterización de las zonas que se encuentran en mayor riesgo de inundación, erosión y pérdida del espacio territorial a lo largo del cauce, que son aquellas ubicadas en las zonas cóncavas de los meandros.

2.2 ANÁLISIS DE CONTRACCIÓN

El análisis de contracción entre los años 2015-2020 y 2020-2022 permite determinar las zonas en las que se ha perdido territorio tras finalizar la temporada de aguas altas del río, sin embargo, se ha de tener en cuenta que este es un proceso dinámico y natural debido a las características del caudal del río y que su análisis puede interpretarse también para conformar un patrón que permita predecir los siguientes cambios en el curso del río y la formación o separación de meandros en los siguientes años.

Comparados los años 2015-2020, para la temporada de aguas bajas del río, el caudal se redujo considerablemente evidenciando que para el año 2015 el río alcanzó niveles más altos en su caudal que en el año 2020, dejando llanuras libres y en ellas sedimentos depositados que alimentan y fortalecen los suelos que posteriormente los habitantes procuran deforestar y cultivar, estas llanuras se generan especialmente donde los meandros se tornan de forma trenzada y en las zonas convexas de los meandros que, con seguridad corresponden a depósitos de sedimentos que quedan luego del arrastre y que en el año 2020 no fueron cubiertos, por un caudal más bajo.

En los años 2020-2022 no hay mayor cambio en el cauce, lo que indica que la temporada de lluvias y el nivel del caudal se mantuvo en estas dos épocas sin mayor variación, sin embargo se logran identificar algunas pequeñas zonas correspondientes a islotes o sedimentos, las cuales fueron determinadas como contraídas.



ÁREAS 2015-2020	ÁREA APROX. CONTRACCIÓN 10.873 Has.	ÁREAS 2020-2022	ÁREA APROX. CONTRACCIÓN 782,4
--------------------	---	--------------------	-------------------------------------

2.2 ANÁLISIS DE EXPANSIÓN

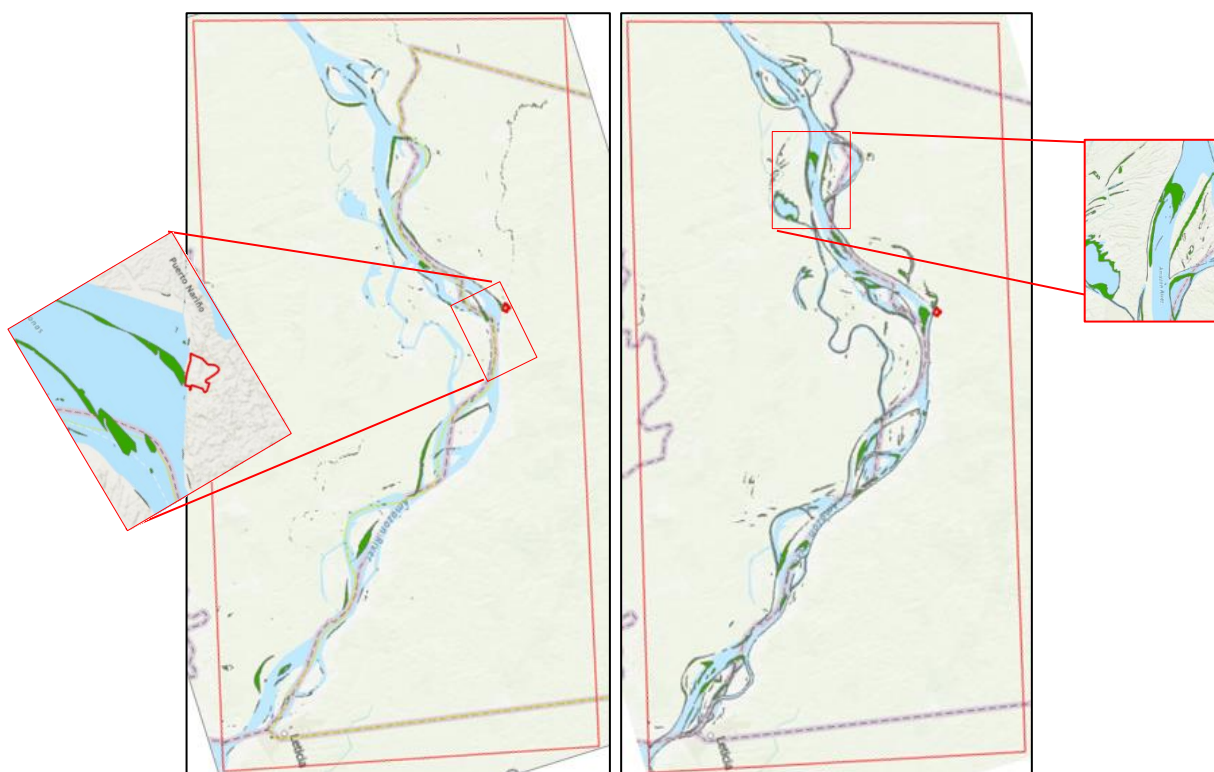
El análisis de expansión entre los años 2015-2020 (imagen costado izquierdo) y 2020-2022 (imagen costado derecho), permite evidenciar el incremento de la frontera del caudal en ciertos sectores, aun en temporada de aguas bajas. Las áreas identificadas en esta comparación, demuestran qué tanto territorio ganó el río en las crecientes del año 2020, territorio concentrado especialmente en los lugares en que suele trenzarse el trazado del río e igualmente se presenta con especial énfasis en las zonas en las que hay una forma cóncava del cauce, ésto debido a las crecientes y a la velocidad que tuvo el caudal en el año 2020 comparado con el año 2015.

Es interés de la presente investigación, el establecer incluso áreas que puedan servir en la identificación de territorios a ser monitoreados para la gestión de riesgos en los municipios y éstas áreas de expansión hacen parte de ésas áreas que pueden

representar un peligro para las poblaciones aledañas y una pérdida potencial del territorio, pues son áreas en las que el cauce empezará a erosionar los suelos por la fuerza y velocidad que el río alcanza en épocas altas de lluvia, lo que conlleva a que sea en estos límites territoriales u orillas identificadas donde se empieza a presentar mayor desprendimiento de tierra, dejando al descubierto las raíces de los árboles que con el paso de los años pierden estabilidad y representan un peligro para la población que se desplaza a diario por el río.

Es posible en este caso, identificar la expansión del cauce en cercanías al municipio de Puerto Nariño, dejando en evidencia la pérdida de una importante y amplia franja de bosque que servía de barrera natural para el Municipio.

A diferencia de las áreas de expansión que se presentaron entre los años 2015-2020, para los años 2020-2022 el río presentó un incremento importante en el área del cauce, a lo largo de todo el cauce, áreas que incrementan las llanuras inundables del río y reducen territorio en los dos países fronterizos.



ÁREAS 2015-2020	ÁREA APROX. EXPANSIÓN	ÁREAS 2020-2022	ÁREA APROX. EXPANSIÓN
	5.245,9 Has		6.635,9 Has.

2.3 EFECTOS SOBRE MUNICIPIO DE PUERTO NARIÑO

Es también objeto de la presente investigación, resaltar cómo la ubicación de la cabecera municipal de Puerto Nariño, en una zona importante de inflexión del cauce,

sobre una zona cóncava de un meandro de gran dimensión, se ha visto afectada por el afluente.

Tal como se documentó [18], y como se puede apreciar a continuación, en el año 2020 el caudal del Río Amazonas arrasó con la isla Zancudo, una franja entera de bosque ubicada frente a la cabecera municipal y que funcionaba como una barrera entre el Río Amazonas y el Río Loretoyacu, sobre el cual se encuentra el municipio. En este sector, el río tiene un cauce de poco más de 1 km de ancho con una profundidad máxima de 40 metros y un caudal que sobrepasa los 60.000 m³ / segundo. A pesar de ser éste un comportamiento predecible del río debido a su trazado, su dinámica y el cambio de curso forzado en esta zona debido a la inflexión del trazado, existen procesos que aceleran éste tipo de afectaciones, como lo son la erosión, provocada por el mismo río y la deforestación provocada por los pobladores que talan árboles para nuevas zonas de cultivo, aprovechando los nutrientes que dejan las aguas altas en los suelos de las llanuras aledañas al río, sin tener en cuenta que están destrozando una barrera natural que protege al municipio del afluente. En las siguientes imágenes fue documentado el nivel de afectación sobre la rivera del municipio, la pérdida del puente y la amenaza de derrumbes en la rivera.



Ilustración 7 Efectos de la creciente 2020 sobre Puerto Nariño. Fuente: Revista Semana [6]

La pérdida de ésta franja de protección natural, deja al municipio a merced del caudal del río y de su impacto directo en temporada de lluvias, igualmente esto acelera la erosión sobre el suelo y la pérdida del área de la cabecera municipal, lo que se puede convertir en un peligro inminente para la población que habita en la zona más frontal del municipio. En las siguientes imágenes es posible identificar las llanuras de la parte baja del municipio de Puerto Nariño, que se encuentran en riesgo de desaparición y la delgada línea de suelo que divide actualmente al Río Amazonas (costado izquierdo) del Río Loretoyacu (costado derecho Ilustración No. 8), además de la magnitud de la exposición del municipio ante el inmenso cauce en éste punto de inflexión, del Río Amazonas (Ilustración No. 9).



Ilustración 8 Frontera Río Amazonas-Río Loretoyacu visto desde parte baja (izq) y parte alta (Der.) en Puerto Nariño

3. CONCLUSIONES

- La comparación de las áreas del cauce del Río Amazonas a lo largo de la frontera colombiana permite comprobar que en el año 2015 el cauce presentó un caudal mucho más alto a comparación del año 2020.
- En el año 2020 el Río Amazonas inundó y arrasó con un área aproximada de 145 Has que corresponden a una isla conocida como Zancudo y sus alrededores, una barrera natural cuya pérdida deja al Municipio de Puerto Nariño dentro del afluente del río, lo que repercute en la aceleración de la pérdida territorial del municipio.
- Las áreas identificadas en el estudio como áreas de expansión del cuerpo hídrico en las 2 ventanas de tiempo analizadas, son nuevas zonas en riesgo de erosión del suelo, progresivos derrumbes y caída de árboles de gran magnitud que ponen en riesgo a las poblaciones aledañas y a sus actividades socioculturales, por ende, son zonas aptas para tener en cuenta en los Planes de Gestión de Riesgo municipales para iniciar procesos de prevención y protección, al igual que sobre la cabecera municipal de puerto Nariño.
- Éstas áreas identificadas deben ser objeto de control ante la posible deforestación por parte de los pobladores para la instalación de nuevos cultivos, deforestaciones que aportan al daño ambiental que tanto afecta a la Amazonía y al mundo entero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Cepal y Patrimonio Natural. (2013). Amazonia posible y sostenible. Bogotá: Offset Gráfico Editores

[2] Naranjo Sepúlveda, O.A. Janayari Ecolodge (Trabajo de Grado). (2021). Arquitectura y Artes, Arquitectura, Universidad Piloto de Colombia. Bogotá. 54p.

- [3] Tuuki, E., Jokinen, P. & Kalliola, R. (1996). Migraciones en el Río Amazonas en las Últimas Décadas, Sector Confluencia Ríos Ucayali Y Marañón - Isla De Iquitos. En: Folia Amazónica, Vol 8(1), 111-130.
- [4] Cardona Pérez, V. (2017). Indígenas conviven con las inundaciones del Río Amazonas. En: Periódico UNAL.
- [5] Rojas Ulloa, D., Rodríguez Buitrago, A., Gutierrez, F. (2019). Cálculo de los límites de cambio aceptable (Iac) en el casco urbano del municipio de Puerto Nariño - Amazonas, Colombia. En: Revista de Tecnología, Vol 16 (2), pp. 78-89.
- [6] S.I. (2020). Alerta en Puerto Nariño por incremento del caudal del río Amazonas. En: Semana, tomado de: <https://www.semana.com/puerto-narino-en-grave-riesgo-por-el-rio-amazonas/54250>
- [7] Rodríguez Barrientos, Y., y Velázquez Bermudez, J. (2020). Informática Habana. Tomado de <http://www.informaticahabana.cu/sites/default/files/ponencia-2020/GEO099>
- [8] IDEAM. (2012). Informe Río Amazonas. Bogotá, tomado de: http://www.ideam.gov.co/documents/14691/16498/INFORME+LETICIA+_agosto+2012.pdf/53e9d83c-8e4f-4f70-9cec-66ad72db5dc0
- [9] Palma, L., Núñez, M. & Duque, S. (2014). Efecto de la conectividad del Río Amazonas sobre la física y química de las aguas en ambientes de la planicie aluvial de Colombia. En: Revista Colombia Amazónica, Volumen No. 7, pp. 129-148.
- [10] Department of the Interior U.S. Geological Survey. (2022). Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. South Dakota.
- [11] EOS. (2011). Landsat 8. En: <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/#:~:text=El%2011%20de%20Febrero%20de,desde%20el%20buque%20USS%20Vandenberg> . (14,09,2022).
- [12] Rodríguez Torres, L. Análisis multitemporal utilizando imágenes Landsat para la determinación de la pérdida de la capacidad productiva en la cuenca media del río Magdalena. (Trabajo de Grado). (2021). Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. 17 Págs.
- [13] Hanqiu, X. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. International Journal of Remote Sensing. 27. 3025–3033. 10.1080/01431160600589179.
- [14] Gil, A., Padovani, C. & Nascentes, A. (2019). Comparação entre ndwi e mndwi para o mapeamento de áreas inundadas no pantanal do taquari. En: Embrapa, pp. 14-17.
- [15] Jimenez. (2016). Mapear y extraer pixeles de cuerpos de agua usando imágenes satelitales. En: <https://www.hidraulicafacil.com/2016/04/IndicesAgualmgSatelitales.html> (01,11,2022)

[16] Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal. (s.f). Paso a Paso: La Generación de Mapas de Expansión y Contracción de Cuerpos de Agua. En: <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/practica-recomendada-mapas-de-expansion-y-contraccion-de-cuerpos-de-agua/paso-a-paso#Paso%2070>.

[17] García, L. (2011). Sistema Morfoclimático de Zonas templadas. En <http://lauraylageologia4.blogspot.com/2011/12/sistema-morfoclimatico-de-zonas.html>

[18] Universidad Nacional de Colombia. (2020). Río Amazonas amenaza a Puerto Nariño. En: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/rio-amazonas-amenaza-a-puerto-narino>.