



UNIVERSIDAD DEL MAR

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“INFLUENCIA DE LA CUENCA DEL RÍO COPALITA EN LA TASA DE
SEDIMENTACIÓN EN DOS ÁREAS ARRECIFALES DE BAHÍAS DE HUATULCO:
ISLA MONTOSA Y BAHÍA LA ENTREGA”

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS: ECOLOGÍA MARINA

PRESENTA

Biol. Mar. Francisco Muñoz Reyes

DIRECTOR

M.A.I.A. Eduardo Ramírez Chávez

Puerto Ángel, Oaxaca, México

Diciembre, 2020



UNIVERSIDAD DEL MAR

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Puerto Ángel, Oaxaca, Diciembre 2020

Después de haber revisado, analizado y evaluado la tesis: **“INFLUENCIA DE LA CUENCA DEL RÍO COPALITA EN LA TASA DE SEDIMENTACIÓN EN DOS ÁREAS ARRECIFALES DE BAHÍAS DE HUATULCO: ISLA MONTOSA Y BAHÍA LA ENTREGA”** que presenta el Biólogo Marino Francisco Muñoz Reyes con número de matrícula: 2016140008.

Por este conducto, comunicamos que la tesis **SI** cumple con los requisitos académicos para ser defendida públicamente en el examen de grado correspondiente.

M.A.I.A. Eduardo Juventino Ramírez Chávez
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE ECOLOGÍA
Profesor–Investigador UMAR
Director

Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempoal
Profesor–Investigador UMAR
Revisor

Dr. Ramón Andrés López Pérez
Profesor–Investigador UAM-I
Revisor

M.C. Ana María Torres Huerta
Profesor–Investigador UMAR
Revisor

Dra. Jeimy Denisse Santiago Valentín
Pos-doctorante UAM-I
Revisor

Dedicatoria

A mis padres María de Lourdes Reyes Jara & José Francisco Muñoz Salas (Q.E.P.D), siempre estaré en deuda con ustedes y eternamente estarán en mi corazón. Este año 2020 quedará marcado en mi alma, pues me harás mucha falta en mi camino papá, pero agradezco todo tu amor, todos tus consejos, todas las risas, todo el esfuerzo que realizaste para que llegara este día. Sin duda, siempre tomaste las mejores decisiones, pues me diste a la madre más generosa, valiente, amorosa y trabajadora, que día con día nos enseñó a responder a cualquier adversidad, a tener las ganas de prepararnos profesionalmente y ser hombres con valores. Te amo mamá.

Papá no dejes de guiarme, no dejes de aparecer en mis sueños, pues muchas veces es difícil este camino. Extraño a mi mejor amigo. Te amo capitán.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado como becario y al proyecto “Caracterización del paisaje sumergido del Parque Nacional Huatulco y gasto de la cuenca Copalita”, financiado por la Universidad del Mar Campus Puerto Ángel, porque a partir de este proyecto se realizaron los muestreos mediante buceo autónomo.

Al M.A.I.A. Eduardo Juventino Ramírez Chávez (UMAR), por darme la oportunidad de trabajar en el laboratorio de sistemas de información geográfica y percepción remota de la UMAR, por su apoyo en esta investigación y porque me impulso a realizar un estudio importante en la toma de decisiones. Al Dr. Miguel Ángel Ahumada (UMAR), Dr. Ramón Andrés López Pérez (UAM-I), M.C. Ana María Torres Huerta (UMAR) y la Dra. Jeimy Denisse Santiago Valentín (UAM-I), por su gran aportación a este trabajo. Sus observaciones lograron que este proyecto sea de calidad. Muchas gracias por el tiempo que invirtieron.

A mis padres, María de Lourdes Reyes Jara & José Francisco Muñoz Salas (Q.E.P.D.), por que, gracias a sus valores y esfuerzo en el trabajo, yo me encuentro cumpliendo esta meta. Papá, te agradezco muchísimo todos los valores que me inculcaste, principalmente la humildad como ser humano, todo el amor, todas las risas, todo el apoyo que le brindaste a la familia, me duele muchísimo tu ausencia, ahora tendré que caminar con muchísimo más cuidado, no te olvides de recibirme. Gracias por construir nuestra familia. Mamá, gracias por todo tu esfuerzo, por todos tus consejos, por toda la lucha interminable que te he hecho pasar, por todos los valores que me inculcas a diario, porque sé que has invertido toda una vida en nosotros, tus hijos. Espero un día poder brindarte un poco de felicidad. No olvido mi promesa, algún día tendré el grado de doctor. Te amo, eres inalcanzable.

Mamá & Papá, siempre estarán eternamente en mi corazón.

A mis hermanos (Octavio, Edgar, Jesús), les agradezco muchísimo todo el apoyo que me han dado, principalmente el cuidar de papá y mamá. Ustedes saben lo que significa la ausencia de nuestro padre, duele muchísimo, pero también es un ejemplo, porque nos demostró luchar hasta el último momento, porque fue una persona muy responsable, por eso mismo hoy me encuentro de pie y puedo seguir luchando. Siempre contarán con mi apoyo, doy mi vida por ustedes. Gracias a ti, mi pamelita porque siempre serás la fuerza y un motor en la familia. Quiero verte exitosa.

A mi princesa, Daniela Ramírez, porque siempre tuviste las palabras exactas, porque tuviste detalles muy bonitos cuando me encontraba trabajando, porque me diste muchas alas para apuntar hasta la cima. De verdad gracias por todo el amor que tienes, por todo ese amor que se convirtió en un sueño, pase lo que pase, siempre agradeceré tu apoyo, ya dejaste un granito de arena en un extraño. Te amo.

A mis abuelitos, Ofelia Jara Ruiz (Q.E.P.D) & Francisco Reyes Rivera les agradezco todas sus enseñanzas de la vida, tal vez de pequeño no las tomaba muy en cuenta, pero ahora sé que son la base de la vida. Seguimos de pie mi viejita, gracias por seguirme apapachando en los sueños. A mi abuelita Arcelia & Panchito (Q.E.P.D), por las circunstancias no estuvimos muy juntos, pero debo agradecerles ese enorme regalo que me dieron, el mejor papá del mundo. Nos vemos en la eternidad, están en mis oraciones.

A mis tías, Lupe, Silvia, Cristina, Elena, Alicia, porque me he sentido muy cobijado, porque todos sabemos que perdimos físicamente un tesoro y nos duele muchísimo, pero siempre fue una persona tan astuta que ahora nos mantiene juntos. Y a mis primos (Ángel, Fer y Jenny) por su apoyo, son cosas que no tendría como pagar. Gracias por permitirme compartir estos momentos con ustedes. A mi tío José Luis Reyes Jara y familia, por los ánimos, apapachos, felicitaciones. Por no olvidarme y apoyar mi crecimiento

A mis amigos que me acompañaron en la maestría (Sara, Tania, Brillo, Sandra, Quetzz & Erick, Adán), y de los que siempre he conseguido palabras de aliento y muchos ánimos (Gregorio, Cosmito, Juan, Ana, Ada, Claudia, Jan, Luis Salgado y familia, Cotsi, Lenin, Javier & Lucia, Idania Valdez), de verdad muchas gracias.

Resumen

Los arrecifes de coral son ecosistemas muy productivos, para sobrevivir, requieren de condiciones ambientales específicas que pueden ser alteradas a través del flujo de agua proveniente de las cuencas hidrográficas. Por lo tanto, es importante regular los procesos de erosión en la cuenca, causados por los cambios de uso de suelo, debido a que aportan gran cantidad de sedimentos a los ríos. En el presente estudio se identificaron los usos de suelo de la cuenca del Río Copalita, con la finalidad de conocer las regiones más erosionadas durante la transición de diez años (del 2007 al 2017). Así mismo, se determinó la dinámica espacio-temporal de la pluma de sedimentos formada en la desembocadura, mediante el análisis de imágenes satelitales (Aqua-Modis), para conocer su influencia sobre la tasa de sedimentación en dos áreas arrecifales de bahías de Huatulco; Isla Montosa y bahía La Entrega. Se identificó que para el año 2007, los usos de suelo que mayor extensión presentaron fueron vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino encino (VSAR/BP), selva mediana caducifolia (SMC) y agricultura de temporal permanente (ATP); representados por el 27.09% (17484 ha), 20.92% (13501 ha) y 10.78% (6959 ha), para el año 2017 fueron la selva mediana caducifolia (SMC) con 45.20% (11499.23 ha), vegetación secundaria arbórea de selva mediana caducifolia (VSA/SMQ) con 22.55% (5738.33 ha), vegetación secundaria arbórea de bosque de pino encino (VSA/BPQ) con 7.40% (1884.47 ha) y bosque de pino encino (BPQ) con 7.37% (1875.04 ha). El proceso de erosión muy fuerte dominó en los dos años de estudio, sin embargo, para el año 2017 aumentaron considerablemente los procesos de erosión de tipo leve, debido a un proceso de recuperación de vegetación. La pluma de sedimentos que se forma en la desembocadura de la cuenca presentó una distribución más amplia en época de lluvias, proporcionando mayores tasas de sedimentación en ambas localidades. Sin embargo, Isla Montosa mostró mayores tasas de sedimentación. Se considera que los cambios espaciales y temporales de la tasa de sedimentación en el área pueden modificar las funciones fisiológicas de los corales y con ello cambiar su estructura coralina.

Palabras clave: Cuenca, erosión, pluma de sedimentos, tasa de sedimentación, corales.

Contenido

Resumen	vi
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
1. Introducción	1
2. Marco teórico	4
2.1 Definición de cuenca	4
2.2 Proceso de erosión hídrica	5
2.3 Transporte de sedimentos	7
2.4 Sedimentación	8
2.5 Relación entre vegetación-erosión	9
2.6 Pluma de sedimentos y dispersión	10
2.7 Formación de Deltas e interacción con ríos	11
3. Antecedentes	13
4. Justificación	15
5. Hipótesis	16
6. Objetivos	16
6.1 Objetivo general	16
6.2 Objetivos particulares	16
7. Metodología	17
7.1 Área de estudio	17
7.2 Determinación de cobertura vegetal y usos de suelo	20
7.3 Análisis de cambio de uso de suelo	20
7.4 Caracterización de la superficie del terreno	21
7.5 Proceso de erosión a lo largo de la cuenca del río Copalita	21
7.6 Análisis de la lluvia y gasto de la cuenca	22
7.6.1 Análisis de lluvia	22

7.6.2 Determinación de la lluvia efectiva y gasto de la cuenca.....	23
7.7 Pluma de sedimento y aporte en la parte marina.....	27
7.8 Determinación de tasas de sedimentación.....	29
8. Resultados	31
8.1 Análisis e interpretación de los patrones de cambio de usos de suelo y determinación de la cantidad de sedimento aportado por zona funcional en la cuenca del río Copalita	31
8.1.1 Determinación de cobertura vegetal y usos de suelo.....	31
8.2 Caracterización del proceso de erosión de la cuenca del río Copalita.....	38
8.3 Proceso de erosión a lo largo de la cuenca del río Copalita.....	39
8.4 Análisis de lluvia y gasto de la cuenca.....	44
8.5 Determinación de la pluma de sedimentos e impacto en tasa de sedimentación	49
8.5.1 Cuantificación del índice de turbidez de la pluma de sedimentos formada en la desembocadura del río Copalita.....	49
8.6 Determinación de tasas de sedimentación.....	53
9. Discusión	55
10. Conclusiones	69
11. Referencias	70
12. Anexos	81

Índice de figuras

Figura 1. Representación de la línea divisoria de aguas o parteaguas. Tomado de Casaverde (2011).....	4
Figura 2. Curvas de capacidad de transporte de sedimentos versus producción de sedimentos. Tomado de Julien (1998).	8
Figura 3. Relación entre cobertura vegetal y la pérdida de suelo (línea continua) con respecto a la escorrentía (línea discontinua) Tomado de Valladares (2004).....	10
Figura 4. Cuenca del río Copalita, Oaxaca.....	18
Figura 5. Sitios de muestreo en bahías de Santa María Huatulco, Oaxaca, México.....	19
Figura 6. Trampas de captura de sedimentos suspendidos utilizados en Isla Montosa y bahía La Entrega, Huatulco, Oaxaca.....	30
Figura 7. Distribución espacial de los usos de suelo y vegetación en la cuenca del río Copalita durante el año 2007.....	33
Figura 8. Extensión en hectáreas de usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita durante el año 2007. Información obtenida a partir de la serie IV del INEGI.....	33
Figura 9. Extensión en hectáreas de usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita durante el año 2017. Información obtenida a partir de la serie VI del INEGI.....	35
Figura 10. Distribución espacial de los usos de suelo y vegetación en la cuenca del río Copalita durante el año 2017.....	36
Figura 11. Matriz de transición de la intensidad anual presentada en intervalos de tiempo para las ganancias (color verde) y pérdidas (color morado).	36
Figura 12. Principales cambios de uso de suelo y vegetación del año 2007 al 2017.....	37
Figura 13. Factor de ángulo y longitud de la pendiente (factor topográfico).	38
Figura 14. Distribución de precipitación media anual (1951-2010) de estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del río Copalita.....	39
Figura 15. Erosividad dentro de la cuenca del río Copalita	40
Figura 16. Distribución espacial del tipo de suelo y textura en la cuenca del río Copalita	40
Figura 17. Factor de vegetación y cultivo de la cuenca del río Copalita para el año 2007	41
Figura 18. Factor de vegetación y cultivo de la cuenca del río Copalita para el año 2017	41
Figura 19. Distribución de las zonas más susceptibles a los procesos de erosión en la cuenca de río Copalita en el año 2007.....	43

Figura 20. Distribución de las zonas más susceptibles a los procesos de erosión en la cuenca de río Copalita en el año 2017	43
Figura 21. Distribución de la precipitación en la cuenca del río Copalita, Oaxaca; método de las isoyetas	44
Figura 22. Distribución mensual de la precipitación a nivel de cuenca.....	44
Figura 23. Hietograma de lluvia total con un periodo de retorno de 1 año.....	45
Figura 24. Hietograma de lluvia total con un periodo de retorno de 100 años	45
Figura 25. Uso de suelo y vegetación	47
Figura 26. Distribución geográfica de los tipos de suelo, cuenca del río Copalita, Oax.....	47
Figura 27. Escurrimiento directo a partir del hidrograma unitario sintético (HUS), de la cuenca del río Copalita, para un $Tr=1$ año.....	48
Figura 28. Escurrimiento directo a partir del hidrograma unitario sintético (HUS), de la cuenca del río Copalita, para un $Tr=100$ años	48
Figura 29. Media mensual de turbidez en La Entrega, Isla Montosa y Copalita derivado de imágenes MODIS-aqua durante el año 2017	50
Figura 30. Variación de temporal de la turbidez en La Entrega, Isla Montosa y Copalita derivado de imágenes MODIS-aqua durante el año 2017	50
Figura 31. Mapas del índice de turbidez de la desembocadura de la cuenca del río Copalita durante el año 2017. Resultado del compuesto de imágenes por meses: a) enero b) febrero c) marzo d) abril e) mayo f) junio.....	51
Figura 32. Mapas del índice de turbidez de la desembocadura de la cuenca del río Copalita durante el año 2017. Resultado del compuesto de imágenes por meses: g) julio h) agosto i) septiembre j) octubre k) noviembre l) diciembre	52
Figura 33. Tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega en el año 2017.....	53
Figura 34. Variación temporal (lluvias y secas) de la tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega en el año 2017	54
Figura 35. Relación espacio-temporal de la tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega	54
Figura 36. Variación de la tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega de agosto 2017 a febrero 2018.....	55

Índice de tablas

Tabla I. Datos generales de las estaciones climatológicas utilizadas. Proporcionados por CONAGUA, ERIC, CLICOM e INEGI de 1980 a 2008.....	23
Tabla II. Valores típicos para N, en función del tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y precipitación antecedente.....	25
Tabla III. Selección del tipo de suelo.....	26
Tabla IV. Nombre, mes y año de las imágenes utilizadas para determinar la pluma de sedimentos en la desembocadura del río Copalita durante el año 2017.....	29
Tabla V. Área y aporte porcentual de los usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita de la serie IV (2007).	32
Tabla VI. Área y aporte porcentual de los usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita de la serie VI (2017).	34
Tabla VII. Intervalos de clasificación de la erosión hídrica.....	42
Tabla VIII. Uso de suelo y vegetación.....	46
Tabla IX. Aporte de sedimento en los diferentes sistemas acuáticos	61

1. Introducción

Entre los ecosistemas acuáticos más importantes, en términos de biodiversidad, se encuentran los arrecifes de coral, formados por corales pétreos capaces de construir grandes estructuras de carbonato de calcio (CaCO_3). Los arrecifes coralinos funcionan como zonas de crecimiento, alimentación y reproducción para diferentes especies de invertebrados y vertebrados (Moberg & Folke, 1999; Vásquez-Domínguez, 2003). Así mismo, ofrecen al hombre una gran variedad de bienes y servicios como alimento, recreación, protección costera y beneficios culturales (Moberg & Folke, 1999).

A pesar de cubrir entre el 0.1 al 0.5% del suelo marino, en estos ecosistemas se alberga cerca de un tercio del total de especies de peces marinos. Se calcula que con aproximadamente 1 km^2 de arrecife de coral con crecimiento activo, se podría abastecer a 300 personas, sin ninguna otra fuente de proteína disponible (Moberg & Folke, 1999; Moberg & Rönnbäck, 2003).

El crecimiento de los corales se encuentra determinado por factores biológicos, químicos y físicos. Entre los factores biológicos, las relaciones de competencia con otros organismos (e. g. macroalgas), es uno de los componentes que mayor presión ejercen sobre la cobertura de los corales (Madigan *et al.* 2004; Márquez & Díaz 2005). Entre los factores químicos más determinantes se encuentra, la alcalinidad del agua que afecta la capacidad y velocidad de los corales para calcificar y formar su exoesqueleto compuesto por carbonato de calcio, influyendo en su crecimiento y fragilidad (Sebens, 1994; Souter & Linden, 2000; Kaufman *et al.* 2011; Liñán-Cabello *et al.* 2012).

Respecto a los factores físicos que tienen mayor influencia en los arrecifes coralinos se encuentra la nubosidad y el aporte de sedimentos que afectan directamente la transparencia del agua (Glynn 1976 y 1977; Glynn & Wellington 1983; Wellington & Glynn 1983; Guzmán & Cortés 1989; Anthony *et al.* 2007). La iluminación es esencial para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis por las zooxantelas simbiotas de distintos clados (A,B,C,D) (Gaulet, 2006), que se encuentran albergadas en la gastrodermis de los corales y que son necesarias para su nutrición (Preston, 1975) pero que, además, determina la distribución batimétrica de los corales. Por su parte, el incremento en la temperatura superficial del mar, es una causa del blanqueamiento de coral, lo que puede ocasionar la muerte de estos organismos (Ben-Haim *et al.* 2003; Meron *et al.* 2009). Mientras que se ha demostrado que pequeños cambios en la salinidad del agua causan una modificación en la función metabólica

de los corales, de la misma manera provocan efectos en la respiración y fotosíntesis de organismos simbiotes (True, 2012). En resumen, los arrecifes son relativamente sensibles a variaciones de tipo biológico, físico y químico, por lo que su estudio es importante para comprender la resiliencia de los sistemas ante perturbaciones naturales o antropogénicas.

Las cuencas hidrográficas son espacios geográficos en donde se transporta agua a través de escurrimientos, que a su vez arrastran grandes cantidades de sedimentos desde la parte más alta hasta un punto de acumulación en la desembocadura de la cuenca, donde se forma una pluma compuesta por una gran variedad de partículas (Hubbard, 1987; Galvis, 2008; Granja-Fernández & López-Pérez, 2008). Los sedimentos se distribuyen a través de los causes del río, como consecuencia de diversas actividades antropogénicas como la deforestación, turismo y diferentes cambios de uso de suelo. Lamentablemente, una gran cantidad de sedimentos provenientes del continente, presentan afinidad a contaminantes y nutrientes, generando altos niveles de estrés a los arrecifes de coral y por consiguiente, modifican las funciones fisiológicas de los corales, ocasionando cambios en la estructura y cobertura de estos ecosistemas arrecifales. (Sebens, 1994; Souter & Linden, 2000; Carriquiry *et al.* 2001; Anthony *et al.* 2007).

Los cambios de usos de suelo y la dinámica de la cuenca del río Copalita aportan grandes cantidades de sedimento que se concentra sobre la superficie del coral, afectando procesos de reproducción y reclutamiento larval (Rogers 1990, Hunte & Wittenberg 1992, Wittenberg & Hunte 1992), reduce la capacidad de captura de alimento de los pólipos (Szmant-Froelich *et al.* 1981, Abdul-Salem & Porter 1988, Stafford-Smith & Ormond 1992), además de que los corales gastan una cantidad de energía considerable en remover el sedimento de su superficie (Stafford-Smith & Ormond 1992, Riegl & Branch 1995). Aunado a lo anterior, es importante cuantificar la tasa de sedimentación en los arrecifes de coral, debido a que presenta variaciones que influyen en la transparencia del agua, esto afecta directamente la penetración de la luz solar a través de la columna del agua (Gómez, 2007).

Las altas tasas de sedimentación afectan el proceso de fotosíntesis realizado por las algas simbiotes (Riegl & Branch 1995; Granja-Fernández & López-Pérez 2008). Asimismo, daña los pólipos en sentido mecánico, debido a que interrumpe el intercambio que se realiza entre el tejido del coral y el agua, influyendo negativamente en el metabolismo del alga simbiote (Jordan-Dahlgren 1989; Granja-Fernández & López-Pérez 2008), Finalmente, el incremento desmedido de sedimentos en la zona costera puede causar efectos drásticos sobre la cobertura de coral (Rogers 1990; Wittenberg & Hunte 1992).

Investigaciones como la de Calzadilla (2002), Vázquez (2012) y Legorrea (2017) se han dado a la tarea de evaluar el desplazamiento de los volúmenes de sedimento, como consecuencia de los procesos de erosión en diferentes cuencas, mediante el estudio multitemporal de fotografías aéreas, ortofotos e imágenes satelitales utilizando sistemas de información geográfica (SIG) para determinar el tipo, evolución, estado y grado de los cambios ocasionados por la erosión del suelo (Camargo *et al.* 2014).

Los primeros modelos hidrológicos y erosivos caracterizaron el proceso de erosión modelando la rotura de agregados del suelo, su transporte y su almacenamiento (Carvajal & Giráldez, 2000). Foster y Meyer (1975) propusieron un modelo que consideraba la intensidad de la erosión, siendo proporcional a la diferencia entre la capacidad de transporte del flujo de escorrentía y el flujo total de sedimentos, así como la capacidad de erosión del flujo de escorrentía que es proporcional a su capacidad de transporte. De la misma manera se desarrollaron modelos como el de Rose (1985) y Sander *et al.* (1996) quienes toman en cuenta la intensidad del desprendimiento de sólidos en función de la intensidad de la lluvia.

Por otra parte, se han empleado modelos de solución numérica que utilizan representaciones simplificadas de las características de las cuencas, por ejemplo, el modelo KINEROS desarrollado por Woolhiser *et al.* (1990) y el modelo EUROSEM (una adaptación de KINEROS) de Morgan *et al.* (1998) aplicable a parcelas y pequeñas cuencas, que simula adecuadamente los fenómenos de rotura de agregados, transporte y sedimentación, a partir de los cuales se pueden obtener hidrogramas y sedimentogramas de eventos de lluvia aislados.

En el presente estudio se identificaron los principales usos de suelo de la cuenca del río Copalita en una transición de diez años (2007-2017). De forma adicional, se empleó la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS, por sus siglas en inglés) para obtener la pérdida de suelo anual por erosión hídrica. Finalmente se utilizaron imágenes de satélite Aqua-Modis para conocer la turbidez y la dinámica espacio-temporal de la pluma de sedimentos formada en la desembocadura, además de cuantificar la tasa de sedimentación en las comunidades coralinas presentes en Isla Montosa y bahía La Entrega.

2. Marco teórico

2.1 Definición de cuenca

Una cuenca hidrográfica es una zona impermeable de la superficie terrestre, donde las gotas de lluvia que caen tienden a tomar dirección sobre el sistema de corrientes hacia una desembocadura. Dicha definición versa sobre una cuenca superficial, mientras que por debajo de ésta existe también una cuenca subterránea, en donde la forma es muy similar a la superficial (Aparicio, 1992; Carabias & Landa, 2008). La adecuada delimitación espacial y temporal de una cuenca permitirá, comprender el funcionamiento y las interrelaciones entre los recursos y condiciones naturales tales como el relieve, el suelo, el clima y la vegetación (Pérez-Vives, 2017).

Las cuencas se pueden dividir en exorreicas y endorreicas. Una cuenca exorreica o abierta es cuando el punto de acumulación terminal está en el mar, mientras que la segunda se trata de un área en la que el agua no tiene salida fluvial al océano. Los principales recursos que tiene una cuenca son los hídricos, el suelo, la flora y la fauna, por lo que su existencia depende de las condiciones topográficas y de su localización geográfica. Dentro de una cuenca pueden encontrarse ecosistemas terrestres (selvas, bosques, matorrales, pastizales, etc.) y ecosistemas acuáticos (lagos, ríos, humedales, etc.). Mientras que el límite de la cuenca queda establecido por el parteaguas (línea imaginaria del contorno de una cuenca hidrográfica, que la separa de las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación) desde donde escurre el agua que se precipita sobre el territorio hasta un punto de acumulación o desagüe (Rodríguez, 2012) (Fig. 1). Una cuenca hidrográfica es reconocida como una unidad territorial adecuada para la gestión integral de los recursos hídricos (Dourojeanni *et al.* 2002).

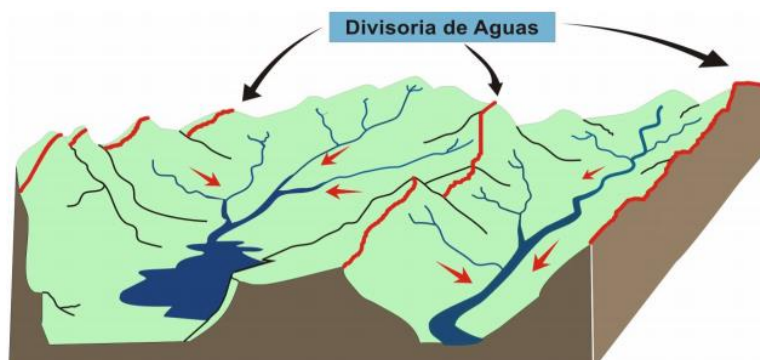


Figura 1. Representación de la línea divisoria de aguas o parteaguas. Tomado de Casaverde (2011).

Los límites de una cuenca quedan definidos por las altitudes y el grado de inclinación de la pendiente, con un punto de cierre en la zona más baja de la cuenca (Luna & Sánchez, 2009; Garrido *et al.* 2010). El establecimiento de los límites de una cuenca implica la demarcación de las áreas de drenaje superficial donde las precipitaciones que caen sobre estas tienden a ser drenadas hacia el mismo punto de salida. La longitud de la línea es el perímetro y la superficie que encierra dicha curva es el área (INE, 2005).

Las zonas funcionales de una cuenca se dividen en alta, media y baja (Garrido *et al.* 2010). La zona funcional alta o también conocida como zona de captación, es donde la precipitación es captada, infiltrada y concentrada, dicha precipitación posteriormente se transforma en un escurrimiento. La zona media o de transición es la región de la cuenca donde se almacena o expulsa agua hacia la parte inferior de la cuenca su capacidad varía en función de la cantidad y duración del agua dentro del sistema. En la zona baja o también llamada zona de salida o emisión se concentran los escurrimientos y se forman los ríos y arroyos (Garrido *et al.* 2010; Pérez 2010 & Enríquez 2010).

En las zonas funcionales (parte alta, media y baja de la cuenca) se lleva a cabo el movimiento de agua, nutrientes, suelo, sedimentos y contaminantes, causando una conexión física entre las poblaciones que se encuentran en la cuenca. Así, la zona costera puede ser definida como el sitio donde ocurren gran cantidad de interacciones desde el parteaguas hasta el océano (Silva *et al.* 2018). Por consiguiente, la zona funcional baja o llanura costera puede ser considerada como el territorio ubicado tierra adentro y principalmente asociado a la línea costera (litoral), además de una gran cantidad de elementos y ecosistemas que la conforman como lo son playas, marismas, manglares, estuarios, humedales y lagunas costeras (Caso & Garrido, 2010).

2.2 Proceso de erosión hídrica

Normalmente el proceso de erosión es considerado como un fenómeno negativo, reflejo de la acción del hombre, sin embargo, es importante recordar que es un proceso natural, el cual es controlado principalmente por la gravedad, y existe un equilibrio entre los relieves y la corteza terrestre (Valladares, 2004; García-Fayos, 2004). Cuando el relieve de cualquier parte de la tierra sobrepasa el ángulo de la pendiente (el cual está determinado por el tipo de material de cada roca) la presión que ejerce la gravedad es mayor, por lo tanto, supera a la fuerza de cohesión y se produce la caída de materiales pendiente abajo (Valladares, 2004). Por el

contrario, cuando la presión disminuye los elementos que constituyen esa porción de suelo son mayormente evacuados por el efecto del arrastre del agua. La cohesión superficial y el desarrollo de vegetación, contribuyen a que el ángulo de la pendiente disminuya, debido a que aumenta la resistencia del suelo. Cualquier desequilibrio debido a la elevación del terreno como consecuencia de la actividad tectónica, por el encajamiento de la red fluvial o por incisiones en las laderas producidas por las actividades humanas, iniciará un nuevo equilibrio, convirtiéndose en una superficie erosiva (Valladares, 2004).

El proceso de erosión puede ser dividido en tres principales fases. La primera fase se refiere al desprendimiento de partículas o porciones de roca madre o bien la rotura de los agregados del suelo, en donde la liberación de partículas ocurre como consecuencia principalmente de la acción de la gravedad, la fuerza del viento, del agua o del hielo, mientras que la rotura de los agregados del suelo se produce principalmente por el impacto de las gotas de lluvia. La segunda fase se lleva a cabo cuando las porciones y partículas desprendidas son transportadas por acción de los agentes erosivos (gravedad, agua y viento), su transporte causa que muchas partículas se vuelvan agentes abrasivos que impactan sobre rocas, provocando el desprendimiento de nuevas partículas o la rotura de los agregados del suelo. En la última fase se produce la deposición de partículas cuando la energía de los agentes de transporte no es suficiente para arrastrarlas o de igual manera cuando son retenidas por vegetación. La dinámica de partículas está controlada por diversos factores tales como el clima, la litología, la pendiente, y los aportes antropogénicos y todos ellos son regidos por las leyes físicas que determinan el comportamiento de los agentes que participan (Valladares, 2004; COBINABE, 2010).

La erosión producida por la lluvia y la circulación del agua por laderas, ramblas (cauces temporales cerca de la costa) y ríos son cuantitativamente los procesos más destacados en la erosión (Sala *et al.* 1991, Grove & Rackham 2001). Se cree que la mayoría del tiempo todos los procesos que participan en la erosión se encuentran ligados entre sí, cuando se produce circulación de agua por los cauces fluviales se está produciendo transporte de sedimentos que han sido erosionados por lluvias aguas arriba (Sala *et al.* 1991). Al mismo tiempo se puede producir erosión y sedimentación en el cauce, aguas abajo o en el mar. De la misma manera la precipitación causa erosión en las laderas, pero gran parte del agua y de los sedimentos quedan retenidos antes de circular por los cauces o en el propio cauce fluvial. Las aguas fluviales tienen la capacidad de modelar el paisaje, lo cual depende en gran medida de la geografía de los barrancos, ríos, ramblas y llanuras aluviales, la pérdida de suelo de las laderas

a causa de las lluvias y la escorrentía se considera de igual manera importante, este último proceso es conocido como erosión hídrica (Valladares,2004).

Es importante mencionar que la erosión hídrica actúa a distintas escalas espacio-temporales, espacialmente puede actuar a nivel microscópico (agregados del suelo) o distribuirse en la parte continental de un extremo a otro a lo largo de la cuenca. Mientras que, a escala temporal, su distribución se puede ver afectada por fenómenos de corta duración, como una tormenta o fenómenos de larga duración como el encajamiento de la red fluvial (Grove & Rackham 2001).

2.3 Transporte de sedimentos

A partir del desprendimiento del suelo, emerge un proceso de transporte de sedimento aguas abajo primordialmente por el flujo de agua. Existen diferentes modos de transporte, algunos de ellos poco representativos, como lo es el efectuado por el movimiento causado por las gotas de lluvia, en cambio el proceso de transporte a causa de la escorrentía del caudal sólido y su transporte aguas abajo ocurre principalmente cuando la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración, por tal motivo la erosionabilidad del suelo decrece cuando la infiltración se incrementa. Es importante recalcar que a partir de que inicia la escorrentía, la cantidad y el tamaño del material transportado se incrementa con la velocidad del flujo de agua (Zambrano, 2015). Se han diseñado un número importante de algoritmos para modelar el transporte de sedimentos, basándose en aspectos físicos, dichos modelos simulan el transporte bajo el concepto de capacidad de transporte, siendo éste la capacidad que tiene un flujo para transportar sedimentos.

La producción de sedimentos y la capacidad de transporte presentan un comportamiento inverso. En un principio la capacidad de transporte es alta pero la provisión de sedimentos es baja por lo cual el proceso de erosión está limitado por la producción de sedimentos. Una vez superado el punto de equilibrio, el flujo sólido estará controlado por la capacidad de transporte. Los flujos aluviales reconocen dos tipos de transporte: el flujo de fondo y el flujo suspendido y dos tipos de flujo sólido de acuerdo al tamaño de partícula: el flujo de lavado y carga de sedimentos de fondo. Por lo tanto, la sumatoria de flujo de lavado, flujo de material suspendido y la carga de fondo, suponen la totalidad del flujo de sedimentos (Fig.2)

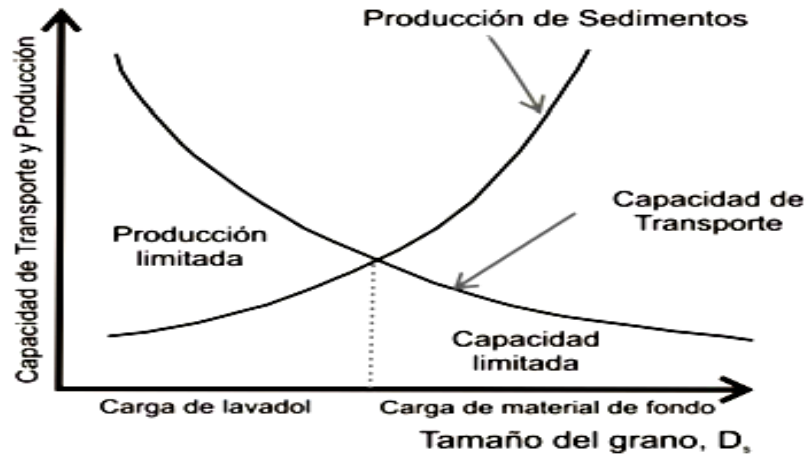


Figura 2. Curvas de capacidad de transporte de sedimentos versus producción de sedimentos. Tomado de Julien (1998).

Para calcular el transporte de carga en suspensión y el transporte de carga total se utilizan fórmulas definidas en función de la capacidad de transporte de sedimentos, en la actualidad las fórmulas utilizadas emplean las ecuaciones de continuidad de masa (ecuación. advección-difusión) (Julien, 1998).

2.4 Sedimentación

El proceso de sedimentación se lleva a cabo cuando la capacidad de transporte del flujo es menor que la cantidad de suelo disponible. De igual manera la capacidad de transporte está determinada por la velocidad del flujo, dicho de otra manera, cualquier proceso físico o biológico que influya en la velocidad de flujo tiene un efecto en la sedimentación. Por lo tanto, los modelos de transporte y sedimentación son abordados de acuerdo con las condiciones del caudal y su capacidad de transporte. Donde las partículas más grandes se depositan primero, mientras que las partículas pequeñas y finas serán depositadas aguas abajo, por consiguiente, la distribución de tamaños de partículas erosionadas conlleva a un fuerte impacto en el proceso de erosión-sedimentación (Zambrano, 2015).

2.5 Relación entre vegetación-erosión

Se considera en la mayoría de los casos que la vegetación tiene efecto positivo sobre la erosión hídrica, debido a que aumenta la estabilidad de los agregados del suelo y la coherencia del suelo, protegiéndolo del impacto de la precipitación, además de incrementar la capacidad de infiltración y frenando la escorrentía (Thornes, 1985). Cuando la precipitación sobrepasa el volumen promedio anual en un área, la vegetación tiene un mayor desarrollo a causa de la mayor disponibilidad hídrica, causando que el proceso de erosión se desacelere (Morgan, 1997).

Los efectos que causa la erosión en la vegetación están relacionados con el desarraigo de las plantas, así como la eliminación y la redistribución de las semillas. Aunque también actúa de manera indirecta, los procesos de erosión alteran o eliminan la superficie del suelo, que es donde se produce el establecimiento de plántulas y donde reside gran parte de la reserva de agua y de gran cantidad de nutrientes beneficiosos para el crecimiento de la vegetación (Valladares, 2004). La erosión hídrica es una fuerza capaz de modificar la composición de la vegetación y su patrón espacial, por tales motivos las relaciones entre erosión y vegetación deben considerarse como un factor determinante. Es importante conocer todos los mecanismos que participan en el proceso de erosión hídrica, debido a que algunos de ellos se encargan de realizar una retroalimentación (Valladares, 2004). De acuerdo con Gyssels *et al.* (2004) existe una relación entre la cobertura vegetal y proceso de erosión hídrica que se ajusta a una curva exponencial hídrica, determinándose en una gran cantidad de escalas, tipos de suelo, climas y tipos de vegetación.

Con base en lo anterior se puede notar que la tasa de erosión disminuye muy rápidamente cuando incrementa la cobertura vegetal hasta alcanzar un punto de inflexión. Una vez alcanzado este punto, la reducción de las tasas de erosión es cada vez menor, aun cuando los incrementos de la cobertura vegetal sean grandes. Cabe resaltar que la relación entre ambas variables puede sufrir modificaciones, sin embargo, la relación indica que el papel de la vegetación en el control de la erosión es mayor a bajas intensidades de precipitación (Fig. 3).

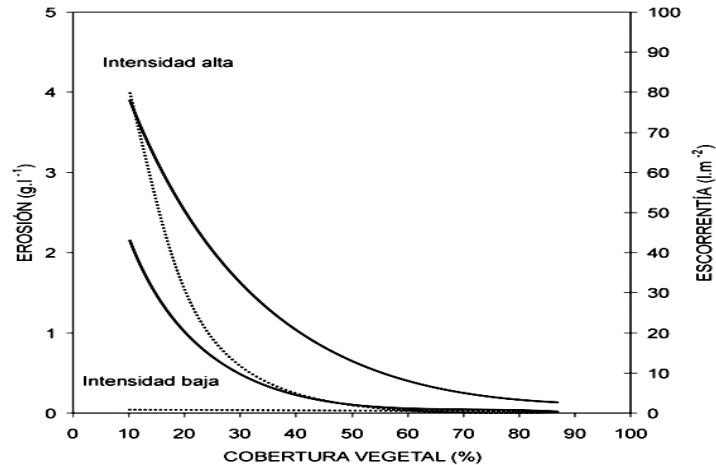


Figura 3. Relación entre cobertura vegetal y la pérdida de suelo (línea continua) con respecto a la escorrentía (línea discontinua) Tomado de Valladares (2004).

La protección del suelo a partir de la vegetación solo parece ser consecuencia de la capacidad de ésta para interceptar la lluvia, a lo que se le puede denominar efecto “paraguas”. Sin embargo, se cree que existe un fenómeno más complejo denominado “esponja” (Valladares, 2004), que consiste en que la precipitación incidente, es interceptada por las hojas y las ramas de las plantas, siendo un porcentaje evaporado allí, mientras que otra cantidad de agua es distribuida a través de las estructuras hasta llegar al suelo, efectuando este procedimiento mediante dos mecanismos: trascolación y escurrimiento cortical (Valladares, 2004). El primero es un fenómeno de formación de nuevas gotas de agua, que se originan por la concentración de ésta en las hojas y ramas de las plantas, en donde se ve implicado el efecto de gravedad que hace que las gotas lleguen al suelo. Finalmente, el escurrimiento cortical es el fenómeno por el que el agua es redistribuida por las hojas y ramas, pero acaba fluyendo al suelo a través del tronco, en donde podría estar causando un efecto menor (Valladares, 2004).

2.6 Pluma de sedimentos y dispersión

La pluma de sedimentos se forma a partir de que los ríos descargan en el mar, aportando gran cantidad de nutrientes, sedimentos y contaminantes. El agua descargada de la cuenca interactúa con el agua de mar por lo cual surgen nuevos gradientes de densidad, en donde a su vez aparecen diferentes masas de agua que se mezclan, causando un nuevo patrón de circulación local (MacDonald, 2003). Las masas de agua proporcionadas por la cuenca se mantienen en la superficie por acción de las fuerzas de flotación, aun cuando se encuentran

cargadas por una gran cantidad de sedimentos disueltos, cabe señalar que al ser menos densas que el agua de mar se mantienen en la superficie, quedando vulnerables a la acción del viento (MacDonald, 2003).

El gradiente de densidad que se genera limita los procesos de transferencia de materia entre las dos capas de agua, inhibiendo el proceso de sedimentación de los sólidos disueltos de las capas superficiales. Por lo que los patrones de dispersión de dichos sedimentos están directamente relacionados con los patrones de dispersión de la pluma de sedimentos formada por el río (MacDonald, 2003).

La pluma de sedimentos estuarina no se genera de forma estacionaria, cuando ocurre una descarga inicial de agua dulce hacia el mar se genera un patrón de circulación particular, que permitirá la formación y el desarrollo inicial de la pluma, la cual es suficientemente fuerte para no verse destruida por la acción de otras fuerzas inducidas por los vientos o a causa de las mareas, de tal forma que la pluma alcanza un estado estacionario. Sin embargo, cuando se produce algún cambio en las condiciones de descarga, comienza la formación de una nueva pluma que incrementa su espesor y su área (MacDonald, 2003).

2.7 Formación de Deltas e interacción con ríos

Los deltas fluviales se construyen en los límites de las costas, entre mares o lagos, por la interacción de los ríos con los procesos de redistribución de ola y marea; la descarga fluvial aporta sedimentos y agua para formar la pluma de sedimentos que se disipa más o menos en la cuenca receptora. El proceso de dispersión depende de la intensidad de los procesos disipativos, que se aceleran gradualmente conforme se acercan a la línea de costa existente (Leeder, 1999). El desarrollo de los medios sedimentarios costeros, como los deltas, está en función de diferentes variables, como lo son la velocidad de aporte de sedimentos terrígenos, el régimen de mareas, el sistema de corrientes y los movimientos de tierra-mar. Estos depósitos se forman a causa básicamente por la interacción entre el aporte de material terrestre en el sistema costero y la capacidad de los procesos físicos marinos para distribuirlos (Selley, 1976). Se cree que los deltas son producto de los aportes fluviales, de tal forma que existe mayor cantidad de sedimentos que los que pueden distribuirse por las corrientes marinas. Cabe mencionar que los ríos proporcionan mayor cantidad de sedimentos finos a las zonas más profundas, lo cual está en función de la velocidad de corriente hacia el mar (Dabrio, 1984)

En el mar se forma una pendiente subacuática del delta que baja hasta el suelo de la cuenca local, construida a partir del sedimento que se desprende de la pluma del efluente disipante. Las pendientes subacuáticas del delta son altamente inestables y tienen un papel de distribución, de igual manera se desempeñan movimientos de masa de pendiente descendiente (Leeder, 1999).

La determinación de la morfología y evolución de los deltas es sumamente compleja debido a que se deben considerar un gran número de variables (Orton & Reading, 1993). Los procesos físicos que intervienen en el desarrollo de los deltas son variables, sin embargo, es importante considerar la naturaleza de la descarga combinada con el flujo de sedimentos y agua que al mismo tiempo emana de la boca de un delta distributivo. La morfología macroscópica de un delta y la distribución de sedimento está determinada por el ciclo de descarga, la fisiografía de la cuenca receptora y el efecto de la marea sobre la descarga de sedimentos, estrechamente relacionada con flujo de expansión que se lleva a cabo en la boca o abertura de una cuenca (Leeder, 1999).

3. Antecedentes

De entre los trabajos realizados en cuencas hidrográficas enfocados a los procesos de erosión causados por los cambios de usos de suelo, resalta el de Calzadilla *et al.* (2000) quienes estudiaron el delta formado en la laguna de Tacarigua (Venezuela) mediante el empleo de imágenes raster del periodo 1962-1999, observado variaciones temporales en las concentraciones de sedimentos a través de los años, siendo el año de 1994 donde se encontraron las concentraciones máximas de producción de sedimentos. Por otra parte, Carvajal y Giráldez (2000) realizaron un estudio para determinar la producción de sedimentos en una cuenca del sistema Cubillas-Colomera en España, aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), donde a partir de simulaciones lograron determinar las zonas más susceptibles al aporte de sedimentos. Sanz (2002) determinó el rendimiento sedimentario de algunos embalses en el río Ebro en España mediante el levantamiento batimétrico y sedimentológico, el autor atribuye que las diferencias de producción de sedimentos se deben a las pendientes pronunciadas, a las mayores tasas de precipitación y a los diferentes usos de suelo y tipos de erosión ocasionando un aporte discrecional según el tipo de cobertura que sea removida. Rial *et al.* (2003) analizaron la cuenca del río Carballas (España) para determinar los aportes de sedimentos y los sólidos en suspensión en los caudales durante el año hidrológico, aplicaron la EUPS para determinar la tasa de erosión y el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR, por sus siglas en inglés). Finalmente, Restrepo y Restrepo (2005) determinaron la relación entre las variaciones del flujo del caudal, la concentración de sedimentos en suspensión y el transporte de sedimentos, con respecto a variables morfométricas, topográficas y climáticas de la cuenca del río Magdalena, donde se obtuvo que los principales parámetros en la variación de sedimentos son la escorrentía y el caudal máximo.

En México, a nivel nacional existen diferentes estudios que tratan de comprender la erosión hídrica. Entre estos trabajos se encuentra el de Pérez *et al.* (2012) quienes estimaron la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras del estado de Chiapas. Los autores utilizaron la EUPS, aplicando la técnica de álgebra de mapas (conjunto de procedimientos que permiten analizar capas ráster y extraer información, generalmente en nuevas capas de datos), mediante la cual se asocia la erosión, las condiciones fisiográficas, topográficas y los diferentes tipos de suelos y factores climáticos en el área de estudio.

En particular para el caso de la cuenca del río Copalita, Rodríguez (2012) desarrolló la construcción de un modelo estocástico para el análisis de los escurrimientos, dicho modelo

fue construido bajo las condiciones del sistema de gestión, evaluación y planificación del agua (GWEPS, por sus siglas en ingles). Un aspecto de suma importancia es que se desarrolla con datos de un periodo de 32 años, a partir del cual se generaron 1000 escurrimientos, que consideraron diferentes condiciones hidrológicas (sequia severa y moderada, condiciones normales, condiciones abundantes, moderadas y extremas). Por otro lado, Ramírez (2014), estudió la relación de aspectos de erosión y escurrimiento del río Copalita, mediante el modelo de evaluación de suelos y aguas (SWAT, por sus siglas en ingles), logrando determinar el flujo base (243.49), flujo lateral (25.21) y el flujo de retorno (218.28) mediante la utilización de datos de escurrimientos y sedimentos obtenidos de la estación hidrométrica La Hamaca. Finalmente, el estudio más reciente realizado en el río Copalita fue desarrollado por Pérez-Vives (2017) quien generó una propuesta de manejo para mitigar la erosión hídrica en la cuenca costera y determinó las zonas potenciales de pérdida de suelo analizando los diferentes cambios de usos presentes en el área. Mediante el empleo de la EUPS el autor mostró que de 1985 a 2013 se perdieron grandes extensiones de bosques y selvas, ocasionando fuertes modificaciones en la estructura (erosión de la cuenca) y función (reducción del flujo en los cauces) de la cuenca ocasionado por el aporte de sedimento. En cuanto a estudios que relacionan el aporte de sedimento de una cuenca con la tasa de sedimentación de las comunidades arrecifales, destaca el de Granja-Fernández & López-Pérez (2008) quienes evaluaron las tasas de sedimentación en seis comunidades arrecifales de la costa de Oaxaca, específicamente en bahías de Huatulco. Los autores observaron que las tasas de sedimentación son heterogéneas entre localidades, determinando la más alta en Isla Montosa e Isla Cacaluta, mientras que las concentraciones intermedias se determinaron en San Agustín, Jicaral-Chachacual y Dos Hermanas y baja tasa de sedimentación en La Entrega.

4. Justificación

Los estudios en la cuenca del río Copalita se han enfocado a estudiar de manera separada el ambiente terrestre y el ambiente marino, dejando de lado los efectos sinérgicos que se generan entre ambos ambientes. En general, los estudios se enfocan en cuestiones hidrológicas, forestales, faunísticas, sociales, geográficas y geológicas. Siendo importante generar información en ambientes terrestres y marinos, para el desarrollo de modelos que determinan los procesos de erosión, transporte de sedimentos y sedimentación.

Los estudios a nivel cuenca son necesarios debido a que su dinámica hidrológica y ecosistémica cambia rápidamente en función de la evolución de las actividades antrópicas, proporcionando gran cantidad de nutrientes y contaminantes a los embalses a través de los sedimentos. El río Copalita radica en que es un sistema que proporciona gran cantidad de agua a la población de bahías de Huatulco y determina la dinámica funcional tanto de los ecosistemas terrestres como marinos, entre los que se encuentran los arrecifes de coral y las comunidades asociadas. El uso de la ecuación universal de pérdida de suelo, ha permitido conocer los cambios de uso de suelo en la cuenca del río Copalita que influyen en la erosión del suelo, como consecuencia de la remoción de cobertura vegetal. Además de ayudar a identificar la cantidad de sedimentos aportados a la región costera, los cuales son distribuidos a través de las corrientes costeras y litorales hasta asentarse en las regiones donde se encuentran los arrecifes de coral.

La relevancia del presente estudio radica en el aporte de información sobre el impacto que experimentan los sistemas coralinos en bahías de Huatulco a partir del desequilibrio sedimentario, generado por los diferentes cambios de usos de suelo y los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca del río Copalita. Al tratarse de un estudio espacio-temporal, la aproximación provee información sobre el cambio en la producción de sedimentos a lo largo de una línea de tiempo.

5. Hipótesis

El aporte de sedimento del río Copalita a la zona marina adyacente está estrechamente relacionado con el cambio de uso de suelo y vegetación, por lo tanto, se espera encontrar que, a mayor cambio de uso de suelo y vegetación, mayor aporte de sedimentos a la zona marina. Además, se espera que la cantidad de sedimentos presente una relación inversamente proporcional con la distancia de la desembocadura del río respecto a los arrecifes coralinos de Isla Montosa y bahía La Entrega.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Evaluar la cantidad de sedimento que se genera desde la parte alta de la cuenca hasta la pluma de sedimentos del río Copalita y su influencia en la tasa de sedimentación de los arrecifes de coral próximos a la cuenca.

6.2 Objetivos particulares

- Identificar la diversidad de grupos funcionales de la vegetación y usos de suelo de la cuenca del río Copalita y su influencia sobre el proceso de erosión de los años 2007 y 2017.
- Determinar la influencia del aporte de sedimento de la parte alta, media y baja de la cuenca del río Copalita en la dinámica de la pluma de sedimentos.
- Cuantificar la tasa de sedimentación en los arrecifes de coral presentes en Isla Montosa y bahía La Entrega.
- Determinar el aporte de gasto de la cuenca Copalita.
- Determinar la relación existente entre la turbidez generada en la pluma de sedimentos formada en la desembocadura del río Copalita y la tasa de sedimentación en los arrecifes de coral de Isla Montosa y bahía La Entrega.

7. Metodología

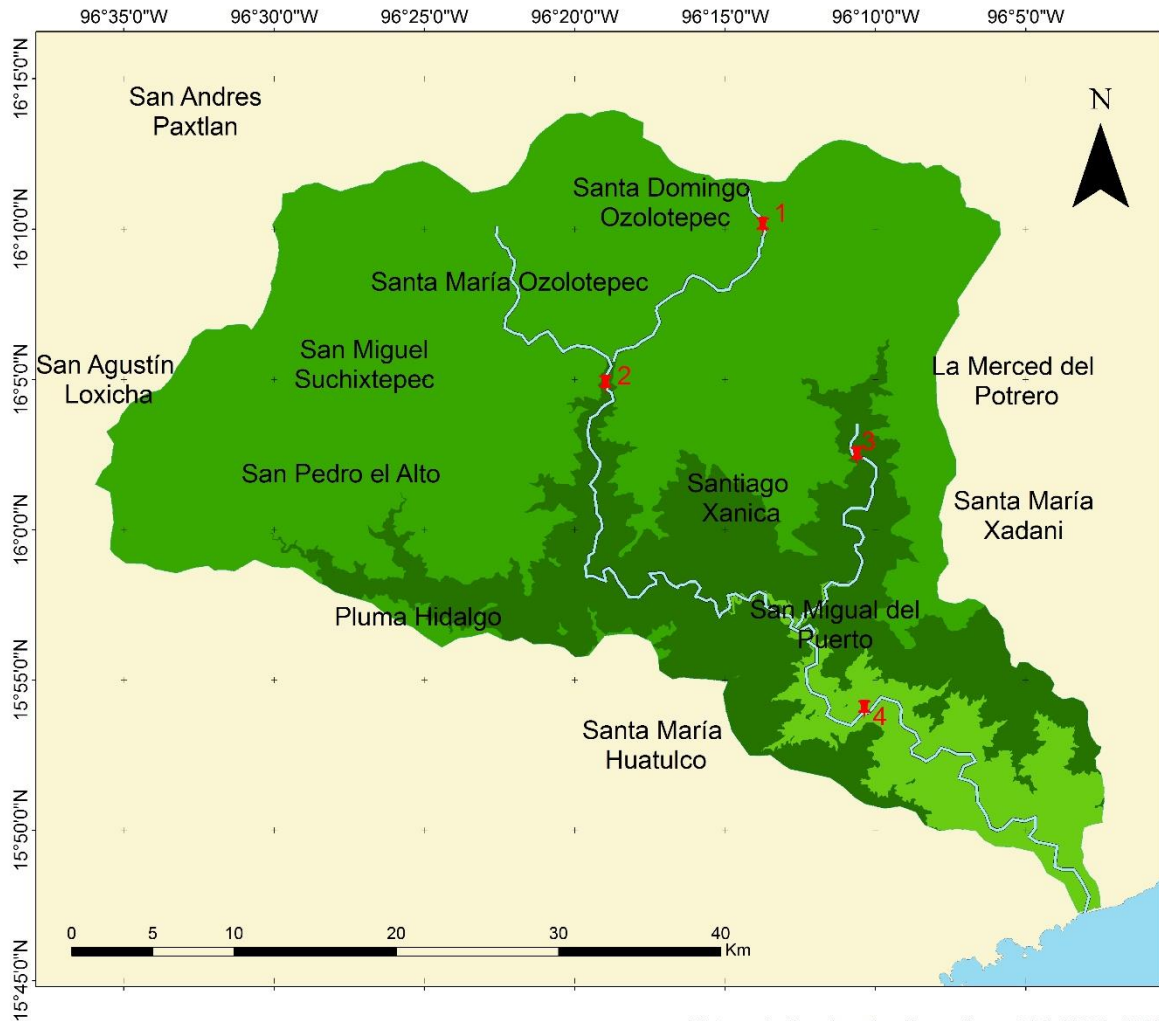
7.1 Área de estudio

La cuenca del río Copalita se encuentra ubicada dentro la región hidrológica número 21 en el estado de Oaxaca, se trata de una cuenca exorreica con desembocadura en la costa del Pacífico Sur de México. Distribuida en 13 municipios del distrito de Miahuatlán, siete municipios del distrito de San Pedro Pochutla y un municipio del distrito de Yautepec (Pérez-Vives, 2017).

La región pertenece a la Sierra Madre del Sur y a las subprovincias Cordillera Costera del Sur, Sierras Orientales y Costas del Sur. Se encuentra entre los 15°47' y 16°30' de latitud Norte y entre 95°58' y 96°36' de longitud Oeste. Su relieve es accidentado. La precipitación media varía de 400 mm en el municipio de San Carlos Yautepec a 3500 mm en los municipios de Pluma Hidalgo, San Pedro el Alto, San Mateo Piñas y San Marcial Ozolotepec, siendo los meses de junio a septiembre durante los que ocurre la mayor precipitación (Rodríguez, 2012).

La cuenca se encuentra a una altura de 2,690 msnm en el cerro de Amialtepec en San Mateo del Río Hondo. El río Copalita está compuesto por tres afluentes principales, el Río San Miguel, el Río Santo Domingo y el arroyo La Cofradía que es nombrado río Yuviaga, el cual nace en el cerro El Chivaro a unos 3,420 msnm. El río Copalita se encuentra muy cercano a la carretera 175 (Cd. de Oaxaca-Puerto Ángel), sin embargo, toma dirección hacia el sureste, cortando la carretera 57 (Pochutla-Santa María Xadani), hasta su desembocadura en el Pacífico Sur de México. La cuenca del río Copalita cuenta con una superficie de 1537.48 km², con un perímetro de 230.82 Km (Pérez-Vives, 2017).

La zona funcional alta (1,200-3,708 msnm) de la cuenca costera del río Copalita se caracteriza por regiones montañosas y lomeríos en donde se pueden encontrar afluentes de primer y segundo orden, mayores pendientes, mientras que altimétricamente es de las regiones más altas de la cuenca, caracterizándose la región central por las montañas más grandes. En la zona funcional media (400-1200 msnm) de la cuenca se encuentran afluentes (tributarios) de segundo, tercero y cuarto orden, se pueden observar colinas y áreas interfluviales (formas de relieve estrechas y alargadas, localizadas entre dos valles), altimétricamente se encuentran entre la parte alta y baja de la cuenca con pendientes medias. La parte baja (10-400 msnm) de la cuenca (emisión) es la parte receptora de toda la red hidrográfica, en donde se incluye el cauce principal, siendo la corriente de mayor orden la cual desemboca en el océano. Las planicies aluviales tienen una escasa inclinación de la pendiente y poca energía del relieve (Garrido *et al.* 2010) (Fig. 4 y 5).



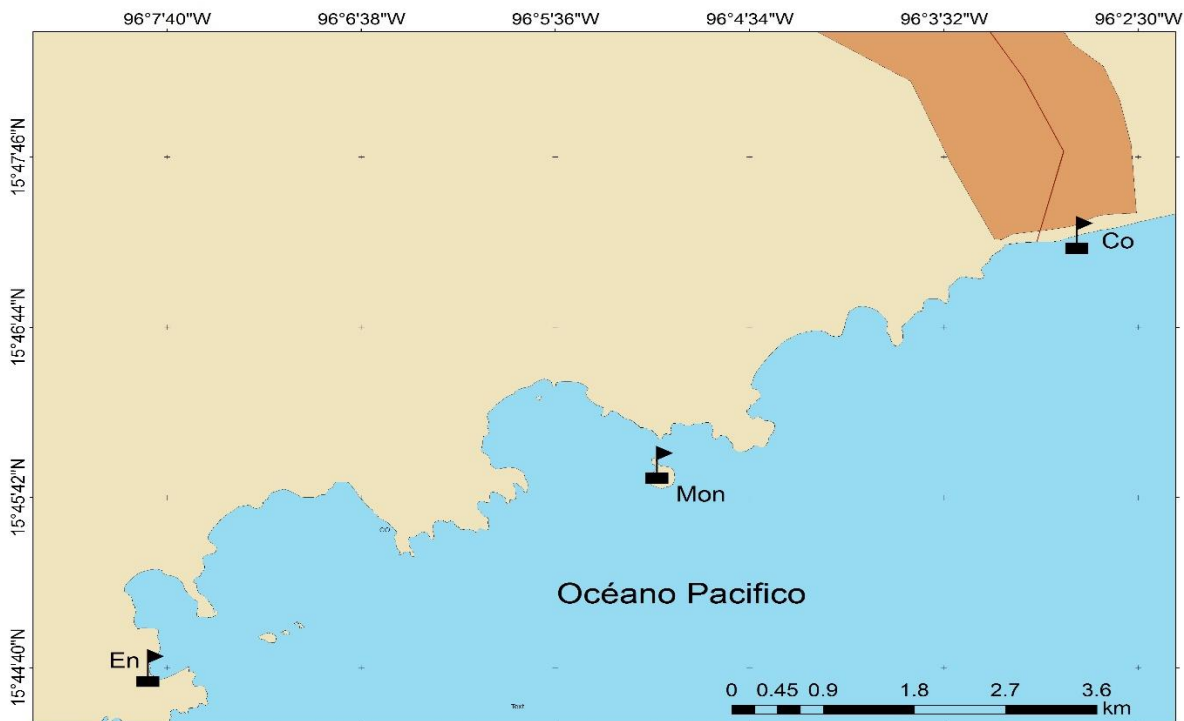
Sistema de Coordenadas Geograficas: GCS_WGS_1984
 Elaboración propia

Simbología

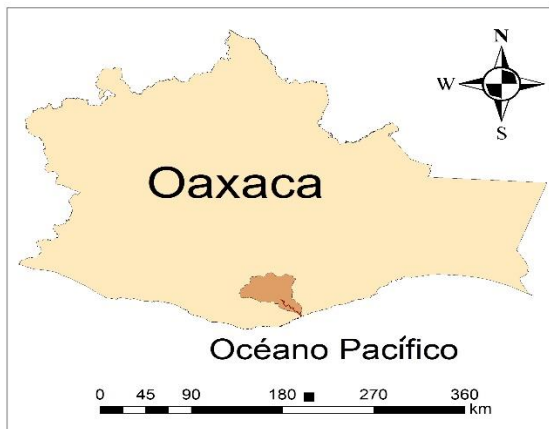
- 1.- Río Santo Domingo 2.- Río San Miguel 3.- Río Yuviaga 4.- Río Copalita
- Cuerpos de agua
- Zona funcional alta (3,700-1,200 msnm)
- Zona funcional media (1199-400 msnm)
- Zona funcional baja (399-10 msnm)

Figura 4. Cuenca del río Copalita, Oaxaca

Bahías de Huatulco



Macrolocalización



Cuenca del Río Copalita



Área de estudio

Co: Desembocadura del río Copalita

Mon: Isla Montosa

En: La Entrega

— Río Copalita

■ Cuerpos de agua

Sistema de Coordenadas: GCS North American 1983 HARN
 Datum: North American 1983 HARN
 Datos: CONABIO

Elaboración Propia

Figura 5. Sitios de muestreo en bahías de Santa María Huatulco, Oaxaca, México

7.2 Determinación de cobertura vegetal y usos de suelo

Para determinar los cambios de usos de suelo y cobertura vegetal se utilizaron los insumos vectoriales proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Para el año 2007 se empleó la serie IV, mientras que para representar el año 2017 fue utilizada la serie VI actualizada en el 2018, ambas a una escala 1:250, 000. En la tabla IV se muestran las claves utilizadas y la información espacial de los diferentes usos de suelo y vegetación del año 2007.

Los insumos vectoriales se homologaron de acuerdo a la jerarquía de usos de suelo y vegetación desarrollada por INEGI. Como en el nivel jerárquico más bajo (i.e., comunidad y otras coberturas), no coincidían los registros, se usó el nivel más alto correspondiente a formación. Una vez homologados los insumos vectoriales, el paso siguiente fue rasterizarlos (proceso por el cual una imagen descrita en un formato gráfico vectorial, se convierte en un conjunto de píxeles o puntos), para lo cual se ajustó el tamaño de píxel siguiendo la regla de escala y resoluciones propuesta por INEGI en 1980. Este proceso garantiza trabajar a una resolución acorde al área de estudio y tener una extensión de píxeles igual para ambos años (INEGI, 2017).

7.3 Análisis de cambio de uso de suelo

El análisis de cambio en el uso y cobertura del suelo se realizó mediante la herramienta modelador del cambio de uso de suelo (LCM, por sus siglas en inglés). El uso de LCM permite que el análisis de cambio de uso de suelo y su predicción se organice en torno a submodelos de transición (Pontius *et al.* 2004). Dicha herramienta permite analizar rápidamente el cambio de cobertura de la tierra, además de modelar empíricamente las relaciones que existen entre las variables explicativas. Esta metodología permitió obtener para cada una de las categorías del uso de suelo, las ganancias, las pérdidas y el cambio neto. Se obtuvo una matriz de transición entre los dos años de estudio mediante el programa IDRISI Selva, obteniendo los intercambios temporales y representándolos de una manera espacial.

7.4 Caracterización de la superficie del terreno

Para la representación del relieve de la cuenca, así como para su delimitación se usó un modelo digital de elevación (MDE) de 15 metros de resolución espacial obtenido de INEGI. El cual se utilizó para realizar los análisis hidrológicos de la cuenca del río Copalita, en donde se consideró la dirección de flujo, acumulación de flujo, magnitud de orden y delimitación de microcuencas. De igual manera se calculó el área que compone a la cuenca, el perímetro y la pendiente que sirvieron de insumos para la EUPS.

7.5 Proceso de erosión a lo largo de la cuenca del río Copalita

Se empleó la EUPS, referente a Universal Soil Loss Equation (Clérico & García, 2001). Su aplicación requirió de estimar el poder erosivo de la lluvia, la erodabilidad de los suelos (índice que indica la vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión y depende de las propiedades intrínsecas del suelo), la cobertura de vegetación, además del conocimiento de las zonas dedicadas al cultivo, así como de la estimación de la pendiente y longitud e identificación de las estrategias aplicadas a la conservación del suelo (Carrera, 2013).

Para realizar la modelación con la EUPS se empleó la ecuación:

$$A=R*K*(L*S)*C*P \quad (\text{Ec. 1})$$

dónde: A es el promedio anual de pérdida de suelo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), R es el factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm} (\text{ha h})^{-1}$), K es el factor de erosionabilidad del suelo ($t \text{ ha h} (\text{MJ mm ha})^{-1}$), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor del grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo del cultivo (adimensional), P es el factor de prácticas mecánicas para el control de la erosión (adimensional).

Para obtener el valor del factor R, fue necesario utilizar los valores históricos de la precipitación media anual (PMA) de 1980 a 2017 obtenidos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Para determinar la erosividad se utilizó la ecuación desarrollada por Cortés (1991), quien de acuerdo a las condiciones particulares de precipitación, regionalizó la República Mexicana en 14 regiones. En función de lo anterior, la cuenca del río Copalita se encuentra dentro de la región 12, para la cual se utiliza la ecuación:

$$R=2.4619*p-0.006067*p^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Para obtener el factor de manejo del cultivo C, se utilizaron las capas obtenidas por el INEGI para identificar los usos de suelo y vegetación dentro de la cuenca empleando el método de Vázquez-Ríos (2012). Finalmente, cada uno de los factores determinados fue multiplicado conforme a la Ec. (1), para determinar el grado de erosión de la cuenca para los años 2007 y 2017.

7.6 Análisis de la lluvia y gasto de la cuenca

7.6.1 Análisis de lluvia

El análisis de la lluvia se realizó mediante el estudio de eventos, elaboración de hietogramas y procesamiento de datos de precipitación, obtenidos a partir de datos proporcionados por el proyecto: Caracterización del paisaje sumergido de las bahías del Parque Nacional Huatulco y su aporte en gastos máximos de la cuenca río Copalita, desarrollado en la Universidad del Mar Campus Puerto Ángel (folio UMAR: 2IE1501), donde se obtuvo conocimiento sobre la distribución de la lluvia a lo largo de la Cuenca del río Copalita, cabe resaltar que la información fue obtenida de estaciones climatológicas cercanas a la cuenca (no mayor a 20 km de radio).

Para el análisis de la lluvia fueron empleados datos pluviométricos de 1980 a 2008, obtenidos de bases de datos nacionales: CONAGUA, ERIC, CLICOM e INEGI. Los registros pluviométricos tuvieron una frecuencia de 24 horas. En la Tabla I se muestra la localización de las estaciones hidrométricas, las cuales fueron seleccionadas de acuerdo a la continuidad de datos, años con datos registrados, menor cantidad de datos faltantes y una distancia no mayor a 20 kilómetros. Para el cálculo de la precipitación media, se empleó el método de las isoyetas (método que consiste en construir en un mapa de cantidades de lluvia por estación, líneas de igual precipitación, las cuales se trazan interpolando los datos puntuales dados por los distintos pluviómetros) (Pizarro *et al.* 2003).

Tabla I. Datos generales de las estaciones climatológicas utilizadas. Proporcionados por CONAGUA, ERIC, CLICOM e INEGI de 1980 a 2008

Clave de estación	Nombre de la Estación	Altitud m.s.n.m	Latitud	Longitud
20342	San José del Pacífico	2485	16.166667	-96.500000
20308	San Mateo Rio Hondo	2226	16.139167	-96.445833
20120	San Miguel Suchixtepec	2453	16.091389	-96.465000
20089	Pluma Hidalgo	1338	15.916667	-96.433056
20106	San Francisco Ozolotepec	1431	16.083056	-96.216667
20256	Xadani	361	15.966667	-96.066667
20206	La Hamaca	192	15.892778	-96.187778
20070	Miahuatlan	1559	16.329444	-96.593889
20111	San José Lachiguiri	1679	16.383056	-96.333056
20333	Huatulco	225	15.816667	-96.316667

7.6.2 Determinación de la lluvia efectiva y gasto de la cuenca

La cuenca del río Copalita es considerada como no aforada, por lo tanto, no cuenta con una medición del gasto en la parte baja de la cuenca, por lo que fue necesario emplear un método para estimar la altura de lluvia efectiva (P_e) a partir de la lluvia total (P) y las características de la cuenca. El método utilizado para este caso fue el del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. (USACE, 1957) mediante el método “números de escurrimiento”, que depende de factores como: tipo de suelo, condición hidrológica, cobertura vegetal y lluvias precedentes. Finalmente se obtuvieron los hidrogramas de lluvia efectiva. Para determinar el gasto de la cuenca fue necesario conocer los cambios de usos de suelo y vegetación.

El comportamiento de la cuenca está determinado por su funcionamiento hidrológico, definido por la relación existente entre las características morfométricas y morfográficas directamente relacionados con los efectos de la lluvia que cae. La información fue necesaria para determinar la cantidad de lluvia que se transforma en escurrimiento directo, el cual marcha sobre el terreno de manera laminar.

La relación entre la lluvia total y la lluvia efectiva está determinada por la capacidad de retención de agua del terreno, la cual es representada por el número de escurrimiento (N), que depende de las condiciones del uso de suelo, de la cobertura vegetal y de las lluvias

precedentes. Por lo tanto, se relacionó la lluvia efectiva-total, con los valores de la curva N, y el ajuste por la cantidad de lluvia, de esta forma se identificó la capacidad de retención del terreno. El método del Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. (USACE, 1957) propone el uso de los números de escurrimiento, el cual dependen de los siguientes factores: tipo de suelo, condición hidrológica, cobertura vegetal y lluvias precedentes.

La Ec. 3 se empleó para calcular la transformación de la lluvia total P , en lluvia efectiva P_e :

$$P_e = \frac{P - \left(\frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde; P , lluvia total, en mm; P_e , lluvia efectiva, en mm; N, número de escurrimiento, adimensional. El número de escurrimiento depende del tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y precipitación antecedente. Los valores de N se seleccionaron de acuerdo a la tabla II, con base al tipo de suelo indicado en la tabla III.

Tabla II. Valores típicos para N, en función del tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno y precipitación antecedente

Uso del suelo y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno, %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	----	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Contorneo	>1	70	79	84	88
	Contorneo	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
	Pastizales	-----	>1	68	79	86
-----		<1	39	61	74	80
Contorneo		>1	47	67	81	88
Contorneo		<1	6	35	70	79
Pradera permanente		>1	30	58	71	78
Bosques naturales		----				
	Muy ralo	----	56	75	86	91
	Ralo	----	46	68	78	84
	Normal	----	36	60	70	77
	Espeso	----	26	52	62	69
	Muy espeso	----	15	44	54	61
Caminos		----				
	De terracería	----	72	82	87	89
Urbano	Con superficie dura	----	74	84	90	92

Tabla III. Selección del tipo de suelo

Tipo de suelo	Descripción de las características del suelo
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil.
B	Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento, son suelos con arenas finas y limos poco profundos.
C	Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros, arenas muy finas, limos; y suelos con considerable contenido de arcillas.
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento. Suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados.

Debido a que existe una infinidad de valores de N, generados por cada tipo de uso del suelo y cobertura vegetal en el interior de los polígonos de las subcuencas, se tuvo utilizó un valor de N promedio, calculado con base en la proporción que por superficie ocupan los valores de N, (Ec. 4).

$$N_{promedio} = \frac{N_1A_1 + N_2A_2 + \dots + N_nA_n}{A_t} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde; A_t , es el área total de la subcuenca, en m^2 ; A_i , área i de la cobertura del valor N al interior de la subcuenca, en m^2 , N, valor N dado para el área A_i .

Se determinó un hidrograma sintético para la cuenca del río Copalita considerando las características morfográficas y morfométricas; con éste se pueden estimar la avenida en los tributarios, las cuales posteriormente confluyen en el cauce principal. Los datos utilizados para construir el hidrograma sintético de escurrimiento pico, incluyen la información de cada una de las estaciones meteorológicas localizadas en coincidencia y adyacencia en toda la cuenca (Tabla I). De esta forma se obtuvo el tiempo de retraso y el tiempo de concentración, proporcionando información para la comprensión de la relación entre humedad del suelo y lluvia, expresada en forma de avenida de diseño.

Para estimar los escurrimientos superficiales generados por la precipitación efectiva se tomaron en cuenta las características físicas de la cuenca, además de considerar los resultados de la estimación de escurrimientos. Se calculó el hidrograma unitario sintético,

mediante el modelo del Servicio de Conservación de Suelos (USACE, 1957) y se determinaron las ordenadas por convolución del HUS. Por último y aplicando el valor de lámina de lluvia efectiva con un periodo de retorno de un año y 100 años se estimó el hidrograma de escurrimiento directo.

Mediante la Ec. 5 de convolución discreta se transforman dos funciones, P_m y H_{n-m+1} en una tercera Q_n (hidrograma de escurrimiento directo)

$$Q_n = \sum_{i=1}^n P_m H_{n-m+1} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde: Q_n representa la enésima ordenada del hidrograma de escurrimiento directo, H_{n-m+1} la ordenada del hidrograma unitario sintético, P_m la altura de lluvia en exceso, $n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots, M$

Para la generación de los hidrogramas en la cuenca del río Copalita se utilizó el programa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center–Hydrologic Modelling System), que es un software del U.S. Army Corps of Engineers para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento (U.S. Army Corps of Engineers, 2000). El programa se alimenta de los datos de las subcuencas como son los hietogramas de lluvia total y las características fisiográficas de la cuenca. Dicho programa no realiza el cálculo de los hietogramas de lluvia sintética, por lo que éstos se determinaron por separado.

7.7 Pluma de sedimento y aporte en la parte marina

La pluma de sedimentos en la desembocadura de la cuenca del río Copalita detectada a través de la turbidez del agua, que es ocasionada por la presencia de sedimentos suspendidos, florecimiento algal, la entrada y resuspensión de sedimentos, así como las escorrentías urbanas y agrícolas. Para su análisis, se obtuvieron de una o dos imágenes diarias por mes, con una separación aproximada de 15 días, derivadas de productos nivel L1b de MODIS-Aqua (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), descartándose las imágenes con mucha nubosidad (Tabla. IV).

El análisis fue realizado para el año 2017, debido a que se carecen de datos que permitan asociar la tasa de sedimentación correspondiente al año 2007 con datos de turbidez

del mismo año. Posteriormente se realizó un corte geográfico desde la desembocadura del río Copalita hasta la bahía La Entrega para observar todos los cambios de turbidez.

La turbidez es la pérdida de transparencia del agua producida por la presencia de sólidos en suspensión, cuando se estima con información satelital derivada de productos L1b MODIS-Aqua a partir de los valores de reflectancia, se denomina Índice de turbidez (IT) (Kahru, 2004). Utilizando el programa WIM/WAM versión 7.5 se realizó el IT mediante el modelo de Descloitres y Schmaltz (2010), conocido como algoritmo corrector de reflectancias “crefl”, en donde se efectuó la corrección de las bandas 1 (620 nm) y banda 2 (670) para la imagen L1b de 250 m. De la misma manera se generó la corrección de las imágenes RGB estándar: Red (0 255), Green (0 255), Blue (0 255) para finalmente calcular el IT en unidades Nefelométricas de turbidez (NTU, por sus siglas en inglés).

Para la obtención de datos puntuales se generó una malla de puntos (malla para muestreo de píxeles), posteriormente se convirtieron las imágenes tipo raster con formato hdf a formato TIFF, donde fueron procesados en el programa ArcMap 10.5. Se utilizaron las herramientas proporcionadas en la paquetería de ArcToolbox, empleando Extrac Values to Points encontrada en Spatial Analyst Tools para extraer los valores de turbidez de los raster mensuales a la tabla de atributos de la malla de puntos predefinida.

Con el propósito de conocer la variabilidad espacio-temporal de la turbidez se analizaron las medidas de tendencia central (media y desviación estándar), posteriormente se verificó la homocedasticidad y normalidad (Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors y Shapiro-Wilk's) de los datos. Para observar la variación de la turbidez entre las localidades (desembocadura del río Copalita, Isla Montosa y bahía La Entrega) y los factores de tiempo (épocas climáticas) se realizó un análisis de la varianza de dos vías con un $\alpha = 0.05$ (Zar, 2010), mediante el programa STATISTICA versión 8.0.

Tabla IV. Nombre, mes y año de las imágenes utilizadas para determinar la pluma de sedimentos en la desembocadura del río Copalita durante el año 2017

Nombre de la imagen satelital	Fecha DD/MM/AAAA
MYD02QKM.A2017001.2010.061.250m_cref_1minus2.remap_Ene3.map	3 enero 2017
MYD02QKM.A2017003.1955.061.250m_cref_1minus2.remap_Ene17.map	17 enero 2017
MYD02QKM.A2017040.2015.061.250m_cref_1minus2.rema_Feb9.map	9 febrero 2017
MYD02QKM.A2017060.1950.061.250m_cref_1minus2.remap_marzo1.map	1 marzo 2017
MYD02QKM.A2017085.1945.061.250m_cref_1minus2.remap_Mar26.ma	26 marzo 2017
MYD02QKM.A2017229.1945.061.250m_cref_1minus2.remap_Abr17.map	17 abril 2017
MYD02QKM.A2017113.2010.061.250m_cref_1minus2.remap_Abr23.map	23 abril 2017
MYD02QKM.A2017121.1920.061.250m_cref_1minus2.remap_May1.map	1 mayo 2017
MYD02QKM.A2017156.1950.061.250m_cref_1minus2.remap_jun5.map	5 junio 2017
MYD02QKM.A2017179.1955.061.250m_cref_1minus2.remap_Jun27.map	27 junio 2017
MYD02QKM.A2017211.1955.061.250m_cref_1minus2.remap_Jul30.map	30 julio 2017
MYD02QKM.A2017250.2000.061.250m_cref_1minus2.remap_Sep7.map	7 septiembre 2017
MYD02QKM.A2017259.1955.061.250m_cref_1minus2.remap_Sep16.map	16 septiembre 2017
MYD02QKM.A2017280.2015.061.250m_cref_1minus2.remap_Oct7.map	7 octubre 2017
MYD02QKM.A2017289.2010.061.250m_cref_1minus2.remap_Octu16.map	16 octubre 2017
MYD02QKM.A2017305.2010.061.250m_cref_1minus2.remap_Nov1.map	1 noviembre 2017
YD02QKM.A2017321.2010.061.250m_cref_1minus2.remap_Nov17.map	17 noviembre 2017
MYD02QKM.A2017337.2010.061.250m_cref_1minus2.remap_Dic3.map	3 diciembre 2017
MYD02QKM.A2017364.1950.061.250m_cref_1minus2.remap_Dic30.map	30 diciembre 2017

7.8 Determinación de tasas de sedimentación

Se obtuvieron muestras mensuales de sedimentos de agosto de 2017 a febrero del 2018, en dos sitios con arrecifes de coral (Isla Montosa y bahía La Entrega). Para la obtención de las muestras se fijaron al sustrato seis varillas de 2 m de largo que sostuvieron los sedimentadores a una altura promedio de 1.5 m para evitar registrar la resuspensión del sedimento. La profundidad a la cual se ubicaron los sedimentadores dependió de cada localidad, pero se procuró que fuera entre 2 y 10 m. Cada estructura fue enterrada en el sustrato 1 m, las trampas se sujetaron con cinchos de plástico. El recolector de sedimento consistió en tubos de PVC de 25 cm de alto y 5 cm de diámetro, que fueron sujetos de manera vertical. Se midió la tasa de sedimentación durante cuatro meses de lluvias (agosto a

noviembre del 2017) y tres meses de secas (diciembre a febrero del 2018), los recolectores fueron remplazados con una periodicidad mensual (Fig. 6).



Figura 6. Trampas de captura de sedimentos suspendidos utilizados en Isla Montosa y bahía La Entrega, Huatulco, Oaxaca

Las muestras fueron filtradas mediante papel Whatman #41, se registró el peso de cada filtro antes de procesar las muestras, posteriormente las muestras fueron secadas en un horno a 70°C (durante 24 horas) para obtener el peso constante. Se determinó el peso neto del sedimento, a partir de diferencias de pesos entre el peso del filtro y el filtro con el sedimento. Después de obtener el peso de sedimento procesado se registró la tasa de sedimentación ($\text{mg cm}^2 \text{dia}^{-1}$), en donde se obtuvo una estimación de acuerdo a los días que pasaron sumergidas las trampas.

Con la finalidad de evaluar si existió diferencia en la tasa de sedimentación a nivel espacial (Isla Montosa vs bahía La Entrega) y temporal (lluvias vs secas), se empleó un análisis de varianza de dos vías, para ello previamente se realizó una evaluación de los supuestos de normalidad y homogeneidad. Para evaluar la relación entre los valores mensuales de turbidez y la tasa de sedimentación de Isla Montosa y bahía La Entrega se utilizó un análisis de correlación de Pearson. Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el software STATISTICA versión 8.0, considerando un $\alpha= 0.05$ (Zar, 2010).

8. Resultados

8.1 Análisis e interpretación de los patrones de cambio de usos de suelo y determinación de la cantidad de sedimento aportado por zona funcional en la cuenca del río Copalita

8.1.1 Determinación de cobertura vegetal y usos de suelo

En la tabla V se muestran las claves utilizadas para los diferentes usos de suelo y vegetación correspondientes al año 2007. Los usos de suelo y los tipos de vegetación determinados para la cuenca costera del río Copalita en el año 2007, están representados en el mapa dispuesto en la Figura 7. Mientras que en la Figura 8, se observan gráficamente los usos que mayor extensión presentaron, siendo la VSAR/BP, SMC y ATP; representados por el 27.09% (17484 ha), 20.92% (13501 ha) y 10.78% (6959 ha), respectivamente. Se observaron al menos dos usos de suelo con un porcentaje de extensión superior al 5%: VSA/SMSP 9.13% (5894 ha) y VSA/SMSC 8.51% (5491 ha). Finalmente, se identificó que los usos con menor superficie fueron VSA/SMC 0.024% (16 ha), BA 0.034% (22 ha) y AH 0.088% (57 ha), en donde se agregan al menos 17 usos de suelo por debajo del 5%.

En la parte más alta de la cuenca costera del río Copalita se observó que la VSAR/BP, BMM, VSAR/BPQ y ATA, son los usos que presentaron mayor extensión. Al igual que en esta región, la zona funcional media tiene una fuerte presión como consecuencia de los usos agropecuarios permanentes y temporales. En la región media de la cuenca se hallaron seis usos de suelo que mejor representan la zona: BMM, VSAR/SMSP, SMC, PI y SAB VSAR/BP. Finalmente, la parte baja de la cuenca se caracterizó principalmente por SMC que se encontró distribuida solo en esa región de la cuenca, además se observaron usos de suelo tales como VSA/SMSP, VSAR/BP y VSAR/BMM (Fig. 7).

Tabla V. Área y aporte porcentual de los usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita de la serie IV (2007).

Clave	Área (ha)	Superficie (%)
VSA/SMC	16	0.024
BA	22	0.034
AH	57	0.088
SG	204	0.316
BMM	217	0.336
PI	227	0.351
BPQ	259	0.401
VSA/BP	270	0.418
BQP	372	0.576
VSA/BPQ	494	0.765
VSA/BQP	527	0.816
VSAR/SMSP	745	1.154
VSA/BMM	782	1.211
VSAR/BQP	929	1.439
VSAR/BMM	1457	2.258
SAB	1588	2.461
ATA	1958	3.034
VSAR/BPQ	2399	3.718
BP	2671	4.139
VSA/SMSC	5491	8.510
VSA/SMSP	5894	9.134
ATP	6959	10.785
SMC	13501	20.924
VSAR/BP	17484	27.097

BA: Bosque oyamel, BMM: Bosque mesófilo de montaña, BP: Bosque de pino, BPQ: Bosque de pino-encino, BQP: Bosque encino-pino, PI: Pastizal inducido, SAB: Sabanoide, SG: Selva galería, SMC: Selva mediana caducifolia, ATA: Agricultura de temporal anual, AH: Asentamiento humano, ATP: Agricultura de temporal permanente, VSAR/BMM: Vegetación secundaria arbustiva de BMM, VSA/BQP: Vegetación secundaria arbustiva de BQP, VSA/BP: Vegetación secundaria arbórea de BP, VSA/BMM: Vegetación secundaria arbórea de BMM, VSA/BPQ: Vegetación secundaria arbórea de BPQ, VSA/SMSC: Selva mediana caducifolia con vegetación secundaria arbórea, VSA/SMSP: Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria arbórea, VSAR/SMSP: Selva mediana subperennifolia con vegetación secundaria arbórea, VSAR/BQP: Bosque de encino pino con vegetación secundaria arbustiva, VSAR/BMM: Bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva, VSAR/SMSP: Selva mediana subperennifolia con vegetación secundaria arbustiva.

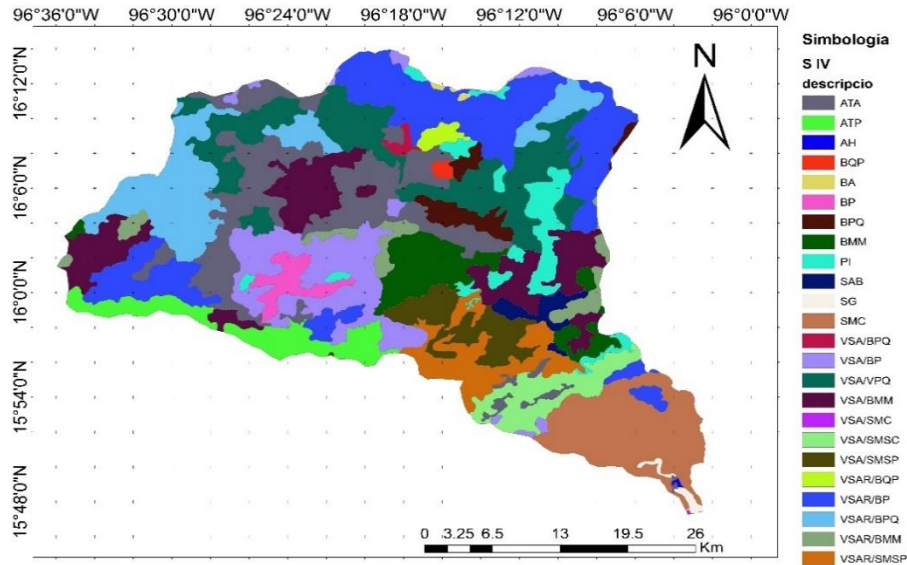


Figura 7. Distribución espacial de los usos de suelo y vegetación en la cuenca del río Copalita durante el año 2007

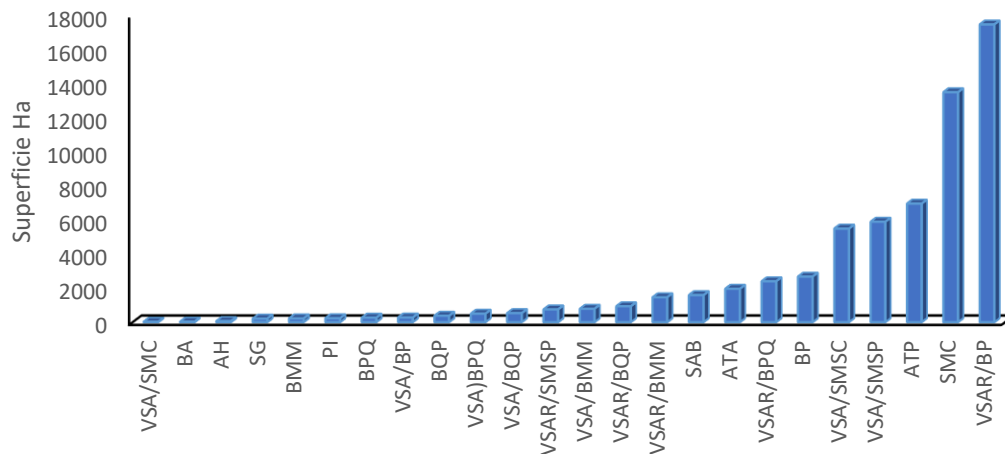


Figura 8. Extensión en hectáreas de usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita durante el año 2007. Información obtenida a partir de la serie IV del INEGI

En la tabla VI, se muestran los diferentes usos de suelo y vegetación que mayor extensión presentaron para el año 2017: SMC con 45.20% (11499.23 ha), VSA/SMQ con 22.55% (5738.33 ha), VSA/BPQ con 7.40% (1884.47 ha) y BPQ con 7.37% (1875.04 ha). Los usos de suelo con menor extensión fueron el BMM, sin crecimiento de vegetación secundaria 0.003% (0.90 ha), VSA/SMQ 0.007% (2.02 ha) y VSA/SMC 0.057% (14.71 ha), en donde se agregan al menos 18 usos de suelo menores al 5% de superficie (Fig. 9). De acuerdo al análisis de cobertura, las coníferas fue la vegetación que más superficie ganó en el año 2017, representados principalmente por pino y encino, principalmente en la zona funcional alta,

también incrementaron los polígonos de bosque mesófilo de montaña. Como consecuencia del abandono de cultivos aumentó el crecimiento de pastizales, específicamente en las regiones cercanas a las comunidades de Santiago Xanica.

Tabla VI. Área y aporte porcentual de los usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita de la serie VI (2017).

Clave	Área (ha)	Superficie (%)
BM	0.90	0.003
VSa/SMQ	2.02	0.007
VSa/SMC	14.71	0.057
VSa/BPQ	50.20	0.197
BA	70.49	0.277
TA	76.18	0.299
TP	94.13	0.370
VSa/BP	101.57	0.399
AH	110.39	0.433
VSI	120.23	0.472
VSa/SMS	129.32	0.508
PC	129.52	0.509
VSA/BM	132.90	0.522
VSa/BM	194.31	0.763
PI	195.18	0.767
SG	299.40	1.177
BQP	325.63	1.280
VSa/BQP	437.62	1.720
BP	568.56	2.235
VSA/BP	572.43	2.250
VSA/BQP	813.45	3.197
BPQ	1875.04	7.371
VSA/BPQ	1884.47	7.408
VSA/SMQ	5738.33	22.559
SMC	11499.23	45.208

BA: Bosque oyamel, BMM: Bosque mesofiló de montaña, BP: Bosque de pino, BPQ: Bosque de pino-encino, BQP: Bosque encino-pino, PI: Pastizal inducido, SAB: Sabanoide, SG: Selva galería, SMC: Selva mediana caducifolia, ATA: Agricultura de temporal anual, AH: Asentamiento humano, ATP: Agricultura de temporal permanente, VSAR/BMM: Vegetación secundaria arbustiva de BMM, VSA/BQP: Vegetación secundaria arbustiva de BQP, VSA/BP: Vegetación secundaria arbórea de BP, VSA/BMM: Vegetación secundaria arbórea de BMM, VSA/BPQ: Vegetación secundaria arbórea de BPQ, VSA/SMSC: Selva mediana caducifolia con vegetación secundaria arbórea, VSA/SMSC: Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria arbórea, VSAR/SMSP: Selva mediana subperennifolia con vegetación secundaria arbórea, VSAR/BQP: Bosque de encino pino con vegetación secundaria arbustiva, VSAR/BMM: Bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva, VSAR/SMSP: Selva mediana subperennifolia con vegetación secundaria arbustiva.

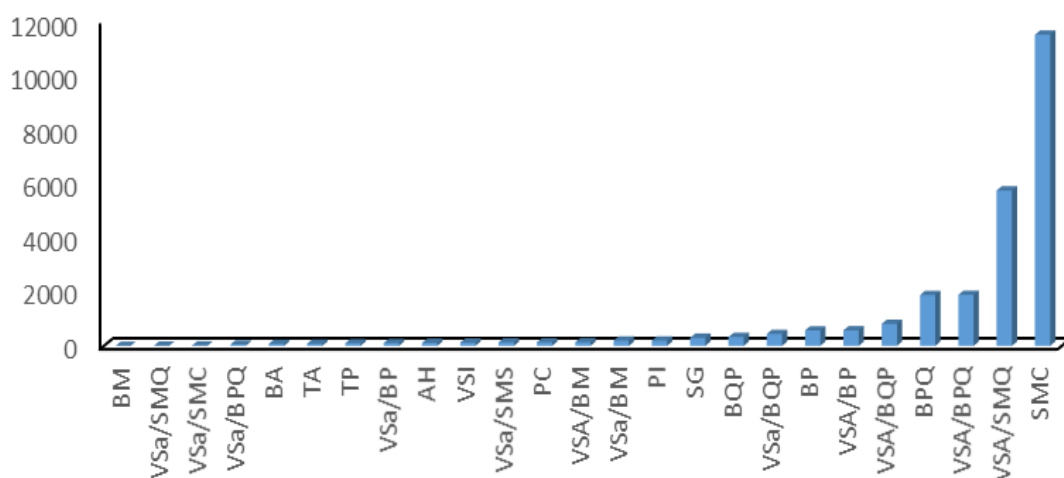


Figura 9. Extensión en hectáreas de usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca del río Copalita durante el año 2017. Información obtenida a partir de la serie VI del INEGI

En la zona funcional alta se incrementan los polígonos de agricultura ATA, observándose un aumento con respecto al año 2007, en dicha región también se encontraron distribuidas áreas de ATP, VSA/BPQ, VSAR/BPQ, y VSA/BMM. En la zona funcional media se observó agricultura temporal y permanente ATP, ATA, así como sembradíos de pastizal PI, de igual manera se observaron regiones de bosque BMM, BP, VSA/BMM, VSAR/BMM, VSAR/BPQ, VSAR/SMSP. Finalmente, en la parte baja de la cuenca se detectaron regiones de selva mediana caducifolia SMC, VSAR/SMSP, además de ciertas manchas de VSAR/SMSC, VSA/BQP, SG, PC, y asentamientos humanos AH (Fig. 10).

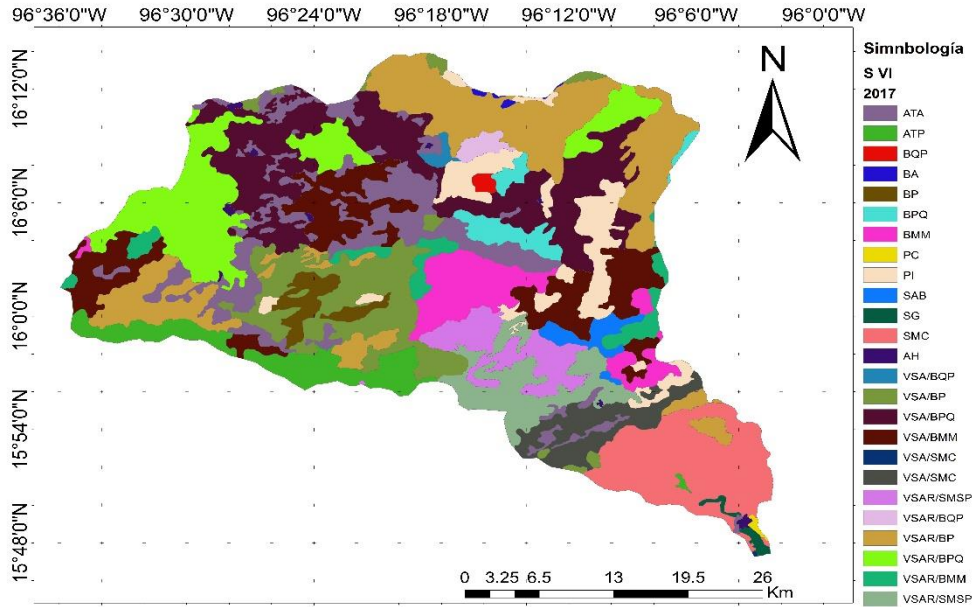


Figura 10. Distribución espacial de los usos de suelo y vegetación en la cuenca del río Copalita durante el año 2017

Los cambios de usos de suelo de 2007 a 2017, fueron representados en una matriz de transición (Fig. 11). Las categorías que presentaron ganancias son: coníferas-latifoliadas, pastizal y agricultura de temporal. Mientras que, las que presentaron pérdidas fueron la vegetación caducifolia y subcaducifolia en la cuenca del río Copalita. Se encontró una transición de hectáreas destinadas a los diferentes tipos de agricultura, remplazados por coníferas-latifoliadas, ya que para esta última categoría se observó el cambio de polígonos destinados a agricultura de temporal, principalmente en la zona sur oeste de la cuenca (Fig. 12).

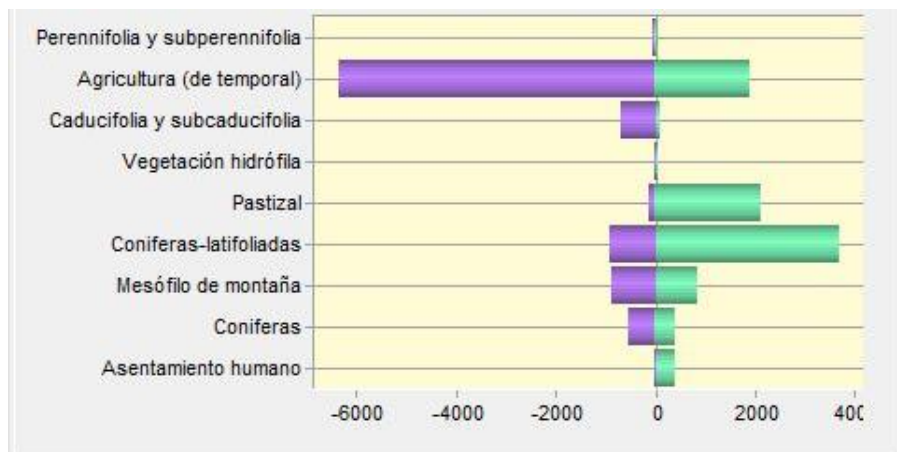


Figura 11. Matriz de transición de la intensidad anual presentada en intervalos de tiempo para las ganancias (color verde) y pérdidas (color morado).

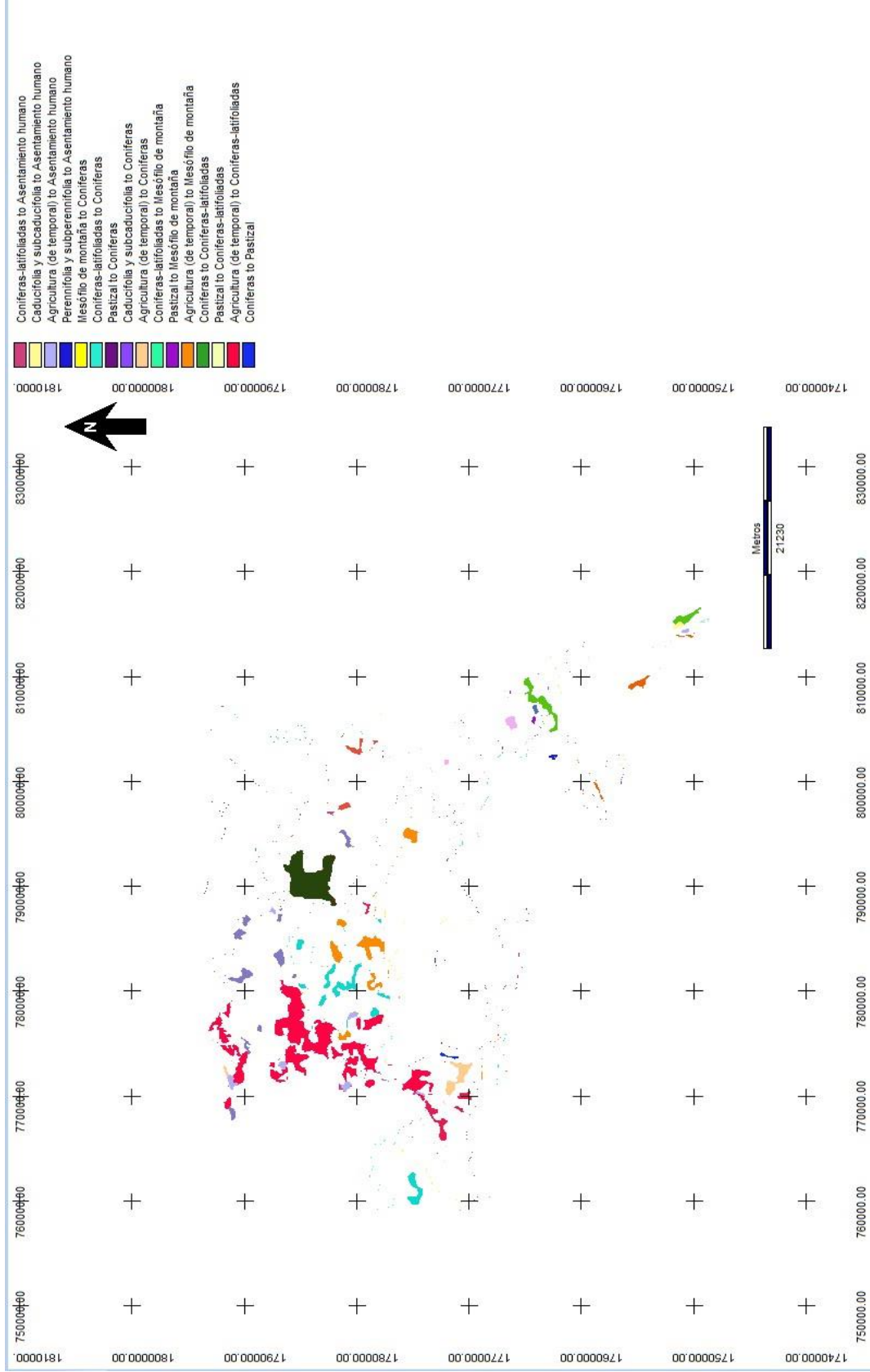


Figura 12. Principales cambios de uso de suelo y vegetación del año 2007 al 2017

8.2 Caracterización del proceso de erosión de la cuenca del río Copalita

Respecto al factor topográfico de longitud y ángulo de la pendiente se observó una variación de 0.02 a 71.71 %. Los valores más altos del factor indican pendientes más pronunciadas, se encontró una pequeña región en la parte alta de la cuenca con valores de 27.85 a 71.71% entre los 96° 21' 0" Oeste (W) y 16°11' 0" y otra región en la parte baja de la cuenca entre 96° 10' 0" Oeste (W) y 15°80' 0". Los valores más bajos del factor en toda la cuenca se observaron en la parte más alta y en la desembocadura de la cuenca. Los valores intermedios del factor LS se observaron distribuidos en la mayor parte de la cuenca, principalmente en la región media. Finalmente, los valores del factor obtenidos varían entre 0.0299 en las partes bajas y 71.7119 en las partes altas (Fig. 13). El factor topográfico de longitud de la pendiente y ángulo de la pendiente (LS), se muestra en la figura 13, un producto obtenido a partir de la caracterización de la superficie del terreno.

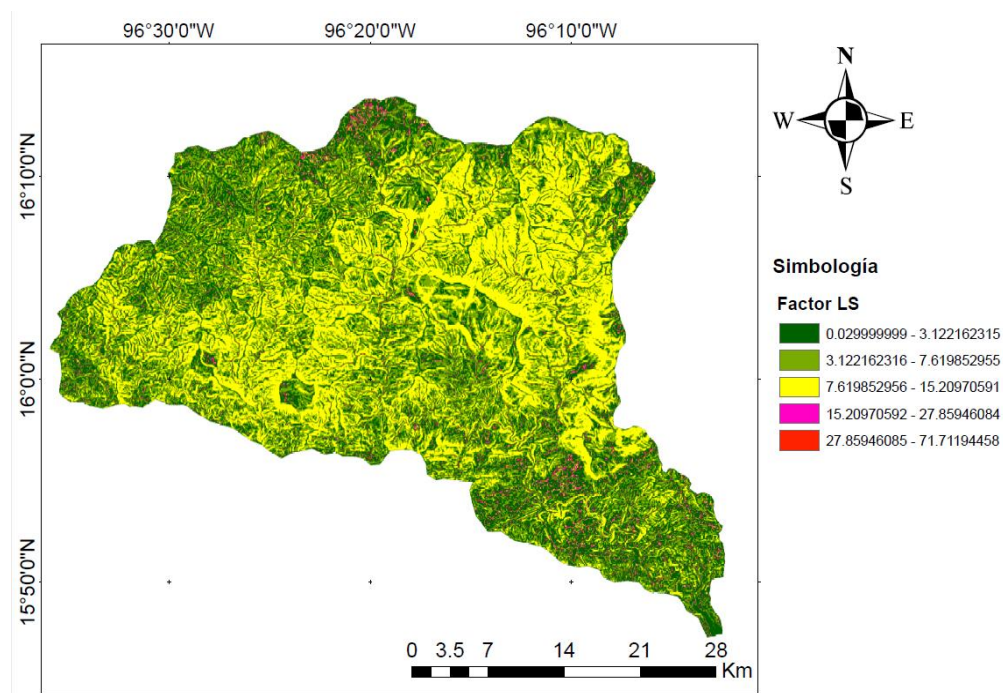


Figura 13. Factor de ángulo y longitud de la pendiente (factor topográfico).

8.3 Proceso de erosión a lo largo de la cuenca del río Copalita

El análisis de la erosión actual del suelo requirió del cálculo de cinco factores R, K, LS, C y P; por lo cual fue necesario multiplicar cada uno de los mapas surgidos de cada factor, obteniendo de esta manera los puntos a lo largo de la cuenca con mayor potencial erosivo. La Figura 13 muestra la distribución de las isoyectas de precipitación, obtenidas a partir de datos de precipitación media anual del año 1980 a 2010 dentro de las estaciones hidrométricas con un radio máximo de 20 Km. Con respecto a las seis estaciones hidrométricas dentro de la cuenca se observó una variación de 1,053.68 a 2,363.75 mm de PMA. En la región noroeste de la zona de cabecera, la concentración de la precipitación mostró valores que van de los 1,120 a 2,300 mm aproximadamente, la parte baja de la cuenca registró valores de precipitación que circulan en los 1,360 mm, siendo a su vez la zona más homogénea. En la región central de la cuenca, pero en dirección oeste se concentraron los valores bajos de aproximadamente 1,680 mm. A partir de estos valores de precipitación se obtuvo el factor R. La Figura 14 muestra que, efectivamente, las regiones con valores más altos de precipitación coinciden con los máximos de erodabilidad y viceversa, indicando que estos son directamente proporcionales.

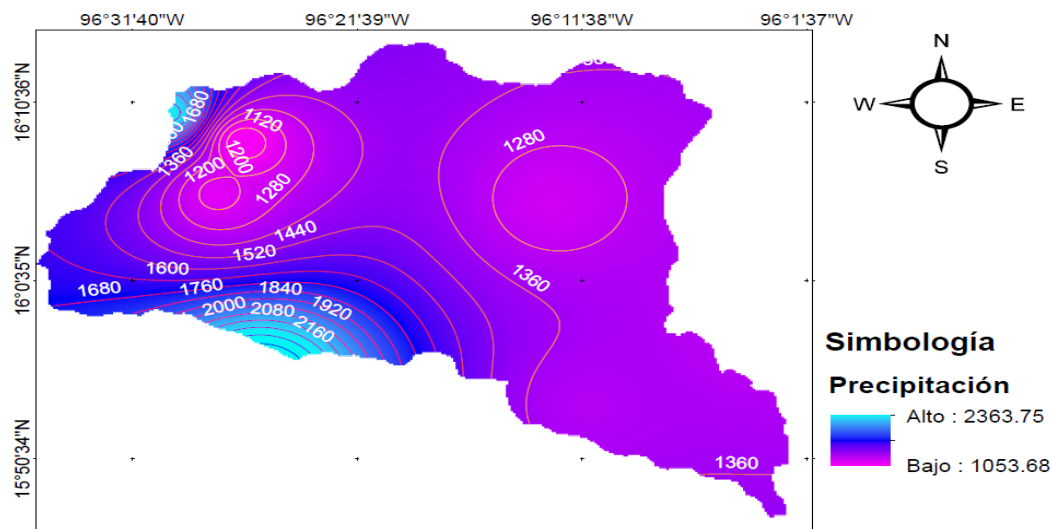


Figura 14. Distribución de precipitación media anual (1951-2010) de estaciones climatológicas cercanas a la cuenca del río Copalita

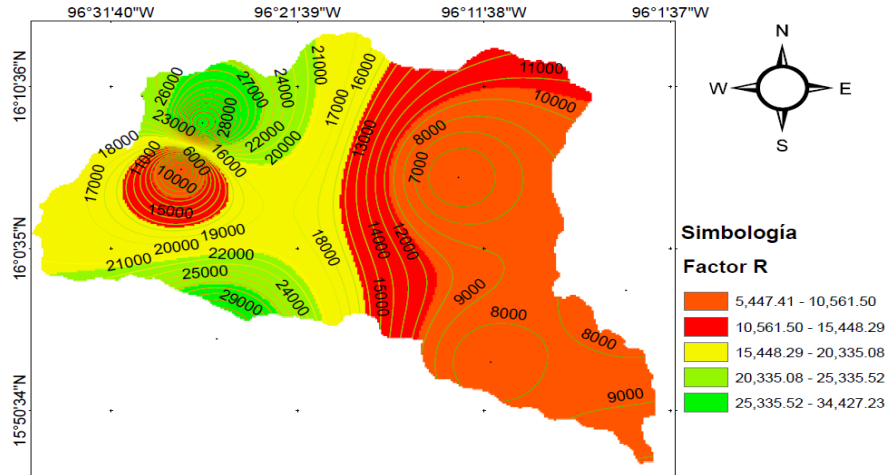


Figura 15. Erosividad dentro de la cuenca del río Copalita

Para determinar el factor K se emplearon los parámetros propuestos por el INEGI, en donde se utilizó la estructura edafológica; según el tipo de suelo y textura, se determinaron los sitios más susceptibles a erosionarse. Las regiones con valores más altos del factor K presentaron mayor susceptibilidad a erosionarse. Por lo tanto, la zona funcional alta, al noroeste y en la región media de la cuenca son las que mostraron mayor susceptibilidad, sin embargo, se notó claramente que la parte baja de la cuenca presentó más resistencia a ser erosionada (Fig. 16).

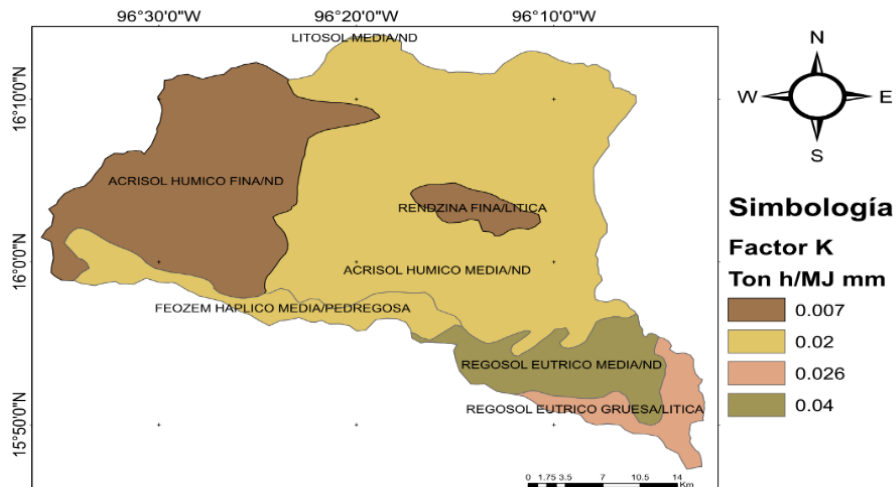


Figura 16. Distribución espacial del tipo de suelo y textura en la cuenca del río Copalita

El factor de vegetación y cultivo (C), se obtuvo a partir de las series proporcionadas por el INEGI. Dicho factor, presenta una variación de 0.0050 a 0.0850. Para el año 2007 se observó que el área de color rojo registra los valores más altos de 0.7473 a 0.8500, está constituida por 26,223.84 ha, principalmente en la región noroeste de la cuenca. Los valores

más bajos fueron representados en color verde, que se establecieron en un polígono muy pequeño con un área de 49.41 ha en la parte baja de la cuenca, muy cercano a la desembocadura.

Para el año 2017 se determinó que las áreas con valores más altos del factor C presentaron valores de 0.7473 a 0.8500 con una extensión de 20,342.71 ha, donde se observó que estos polígonos cambiaron por áreas con valores intermedios de 0.0084 a 0.0182. Finalmente se incrementaron los polígonos con valores de 0.0050 en la parte alta de la cuenca, específicamente en la región noroeste, cubriendo un total de 437.93 ha (Fig. 17-18).

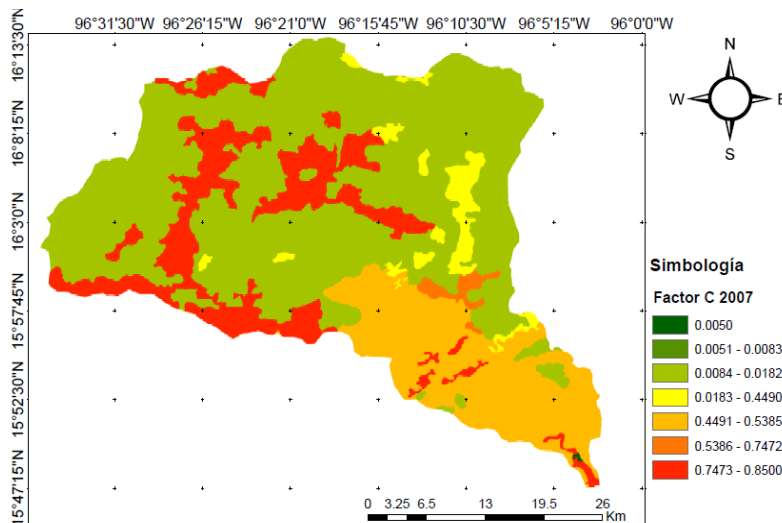


Figura 17. Factor de vegetación y cultivo de la cuenca del río Copalita para el año 2007

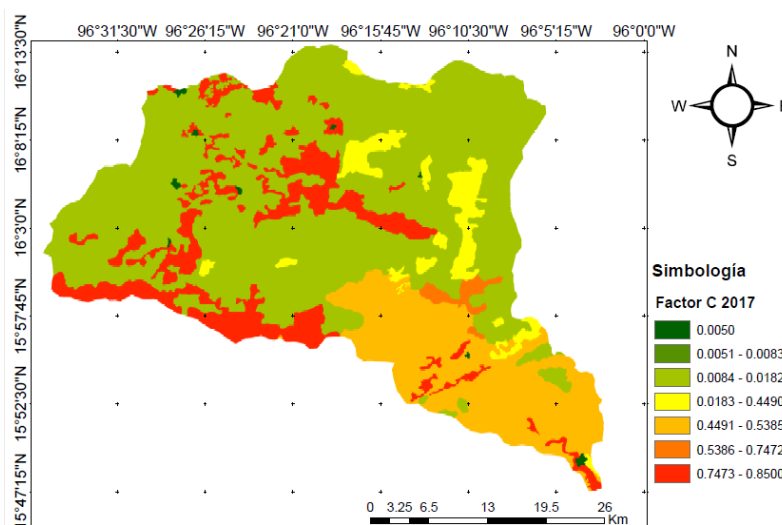


Figura 18. Factor de vegetación y cultivo de la cuenca del río Copalita para el año 2017

La FAO, en 1980 definió un criterio de clasificación de la erosión leve, moderada, fuerte y muy fuerte, la cual fue empleada en la cuenca. A partir de lo anterior, se observa una diferencia espacio temporal de la erosión hídrica entre el año 2007 (serie IV) y 2017 (serie VI; Tabla VII).

Tabla VII. Intervalos de clasificación de la erosión hídrica

Categoría	Unidades (Ton*ha ⁻¹ -año ⁻¹)	Clase
1	0-10	Leve
2	10-50	Moderado
3	50-200	Fuerte
4	200<	Muy fuerte

Para el proceso de erosión se presentan los resultados obtenidos del año 2007 y 2017. Para el primer año de estudio se observaron mayores procesos de erosión en la parte baja de la cuenca, principalmente procesos muy fuertes. Los procesos de erosión leve (de 0-10 Ton*ha⁻¹-año⁻¹) tuvieron dominio a lo largo de la cuenca, desde la parte media a la parte alta. El área que cubre el proceso de erosión leve fue de 122,419.63 ha, mientras que el proceso de erosión muy fuerte (200< Ton*ha⁻¹-año⁻¹) se encontró distribuido en la parte alta y baja de la cuenca cubriendo un área de 170.59 ha.

Para el 2017 se observó que los procesos de erosión que dominan son muy fuertes, con una extensión aproximada de 127,795.89 ha en la región intermedia de la cuenca, iniciando en los 15.9625 N hasta la parte más alta de la cuenca, cercano a la región de Yuviaga. Los procesos de erosión fuertes (50-200 Ton*ha⁻¹-año⁻¹) se distribuyen en una extensión aproximada de 3155.52 ha. En la franja de la región noroeste se observaron procesos de erosión moderado (10-50 Ton*ha⁻¹-año⁻¹), representados por 6208.29 ha (Fig. 19 y 20; Tabla VII).

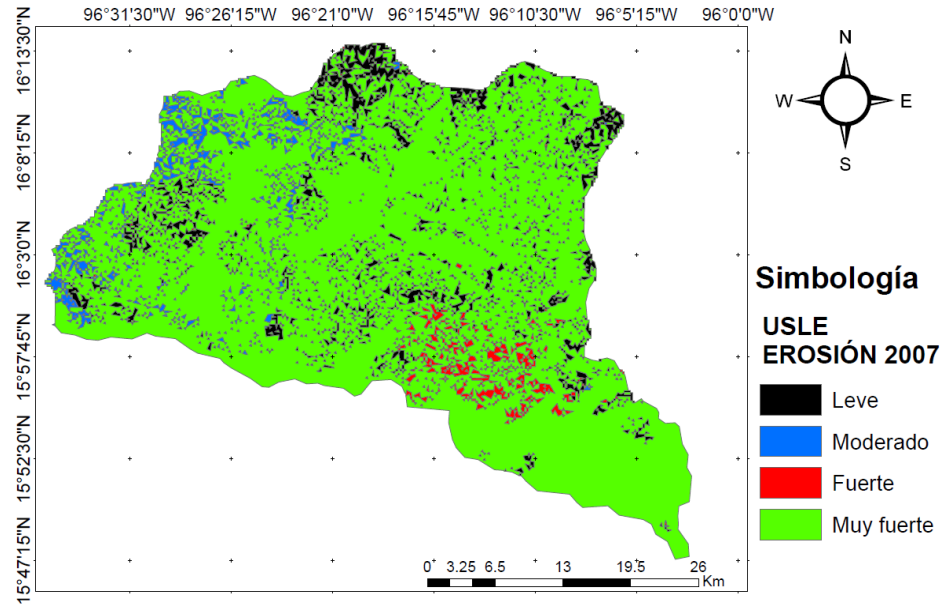


Figura 19. Distribución de las zonas más susceptibles a los procesos de erosión en la cuenca de río Copalita en el año 2007

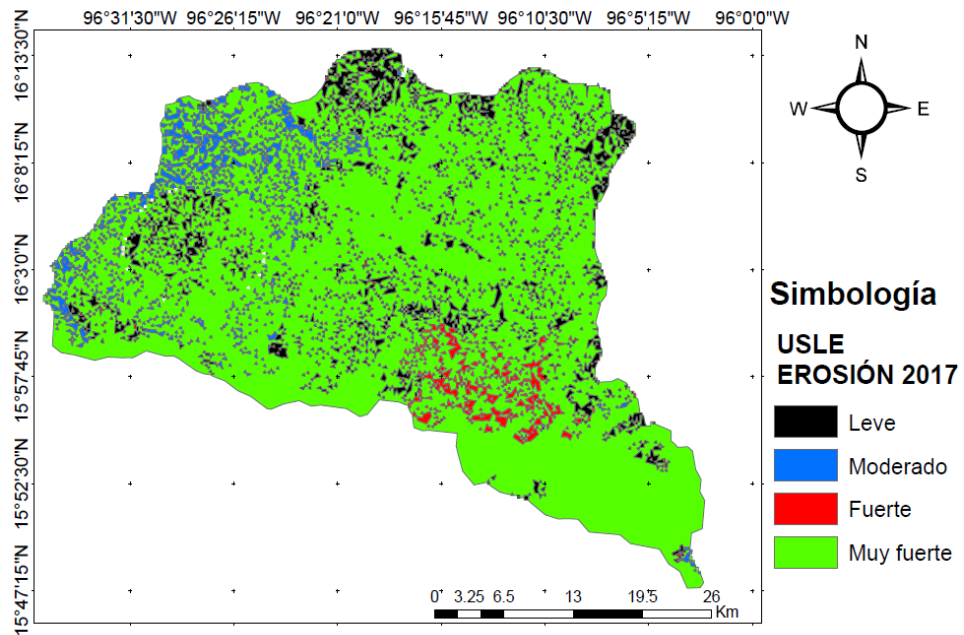


Figura 20. Distribución de las zonas más susceptibles a los procesos de erosión en la cuenca de río Copalita en el año 2017

8.4 Análisis de lluvia y gasto de la cuenca

Los resultados indican que la precipitación media en la cuenca del río Copalita fue de 1.402 mm anuales, para el periodo de 1980-2008 (Figura 21). De igual manera se puede observar que los valores máximos de precipitación se presentan en las estaciones 20089 Pluma Hidalgo y 20342 San José del Pacífico. El periodo donde se registran los mayores eventos de precipitación ocurre de mayo a octubre, con máximos en junio y septiembre. Mientras que los meses con menor precipitación es de noviembre a marzo, siendo el mes de enero el de menor precipitación (Fig. 22).

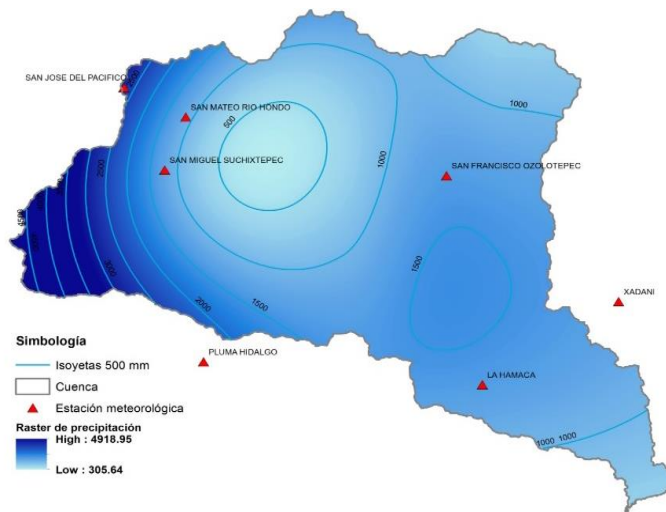


Figura 21. Distribución de la precipitación en la cuenca del río Copalita, Oaxaca; método de las isoyetas

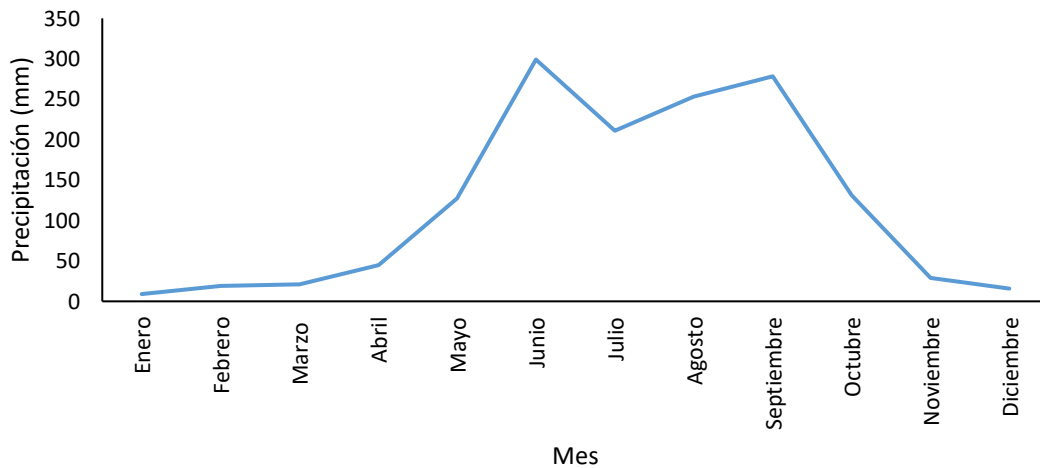


Figura 22. Distribución mensual de la precipitación a nivel de cuenca

En la figura 23 se muestra el hietograma de lluvia realizado para la cuenca del río Copalita correspondiente a un periodo de retorno de 1 año, donde se observa que la lluvia máxima se alcanzó en un tiempo de 8 horas, con aproximadamente 30 mm de lluvia total. Por otra parte, en la figura 24 se muestra el hietograma de lluvia total realizado para un periodo de retorno de 100 años en donde se consiguió la lluvia máxima en un tiempo de 8 horas con 120 mm de lluvia total aproximadamente, los resultados obtenidos indican que los eventos de lluvia actuales aportan menor cantidad de agua.

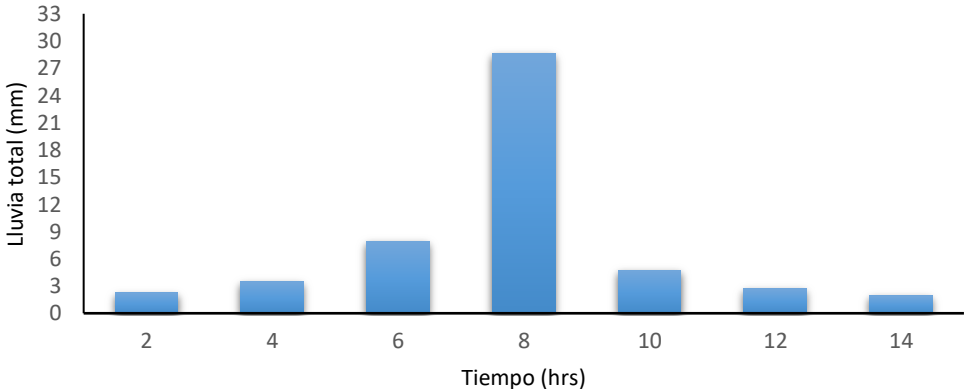


Figura 23. Hietograma de lluvia total con un periodo de retorno de 1 año

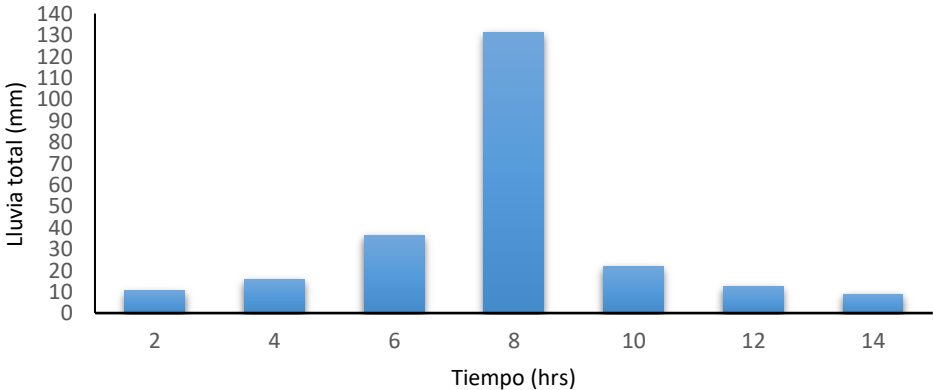


Figura 24. Hietograma de lluvia total con un periodo de retorno de 100 años

Para determinar la lluvia efectiva a gasto, aplicando el método del Servicio de Conservación de suelos de Estados Unidos de América, mediante el método de los números de escurrimiento fue necesario determinar los usos de suelo, por lo cual fueron identificados a partir de la información proporcionada por el INEGI, en donde se lograron determinar 12

clases, mostrados en la tabla VIII. Se puede observar que la vegetación secundaria, la agricultura de temporal anual y la selva son los usos que tienen mayor porcentaje de superficie, por el contrario, quienes tienen menor superficie son los cuerpos de agua, asentamientos humanos y los pastizales cultivados.

Tabla VIII. Uso de suelo y vegetación

No.	Uso de suelo y Vegetación	Superficie km ²	Porcentaje en la cuenca (%)
1	Asentamientos humanos	1.09817	0.071
2	Bosque	69.24809	4.504
3	Bosque de pino	23.25426	1.513
4	Bosque de pino-encino	30.91691	2.011
5	Cuerpo de agua	0.35059	0.023
6	Pastizal cultivado	2.80585	0.182
7	Pastizal inducido	57.99705	3.772
8	Selva	128.30223	8.345
9	Agricultura temporal anual	181.48011	11.804
10	Agricultura de temporal permanente	61.26986	3.985
11	Vegetación secundaria	965.70423	62.812
12	Sabana	15.02659	0.977
		1536.36	

En la figura 25 se observa la distribución del uso de suelo y la vegetación de la cuenca, los bosques de pino, pino-encino localizado en la parte alta. En la parte intermedia de la cuenca la vegetación y el pastizal inducido y cultivado se distribuyen a lo largo y ancho de la cuenca, finalmente la parte baja está compuesta por vegetación, sabana y selvas.

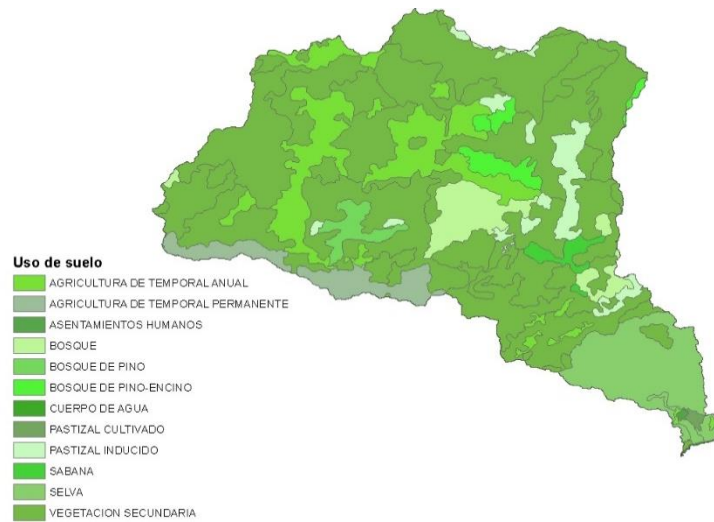


Figura 25. Uso de suelo y vegetación

Se determinaron los suelos más representativos para la cuenca de acuerdo a la información proporcionada por el INEGI (2007), siendo seis grupos quienes componen dicha cuenca en los siguientes porcentajes: Cambisol (29%), Acrisol (31%), Luvisol (30%), Regosol (4%), umbrisol (4%) y Feozem (2%) (Fig.26).

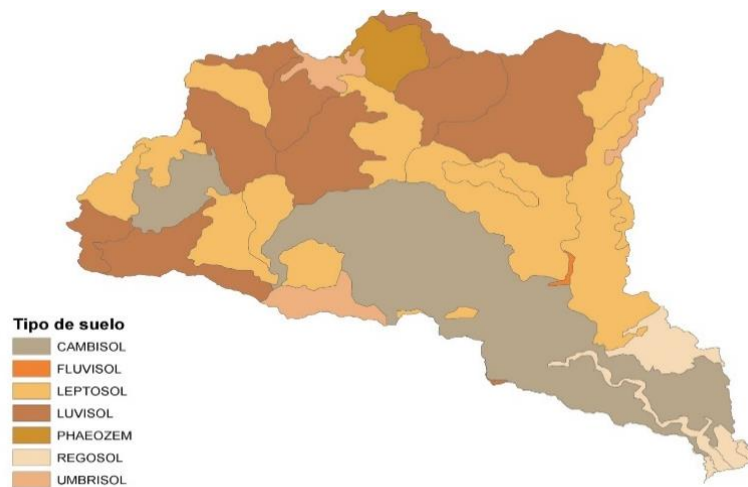


Figura 26. Distribución geográfica de los tipos de suelo, cuenca del río Copalita, Oax.

Los datos obtenidos de la transformación de lluvia a escurrimiento en la cuenca del río Copalita fueron: tiempo de concentración t_c (hrs): 12.4559, tiempo de retraso t_r (hrs): 7.4735,

tiempo pico t_p (hrs): 11.0028, tiempo base t_b (hrs): 29.3377 y gasto pico g_p ($m^3/s/mm$): 29.0438, considerados para el diseño del hidrograma unitario sintético (HUS) (USACE, 1957).

La figura 27 ilustra valores de gastos (m^3/s) para un año. De acuerdo a los resultados, las aportaciones de agua en la cuenca se dan de manera constante, presentando el gasto máximo a las 11:00 hrs, con un valor mayor a $100 m^3/s$, para un periodo de retorno de 1 año y un volumen total de $7,743,254 m^3$. En la figura 28, para un periodo de retorno de 100 años, los escurrimientos quedan por arriba de los $4,000 (m^3/s)$ con un volumen total de $223,512,265 m^3$.

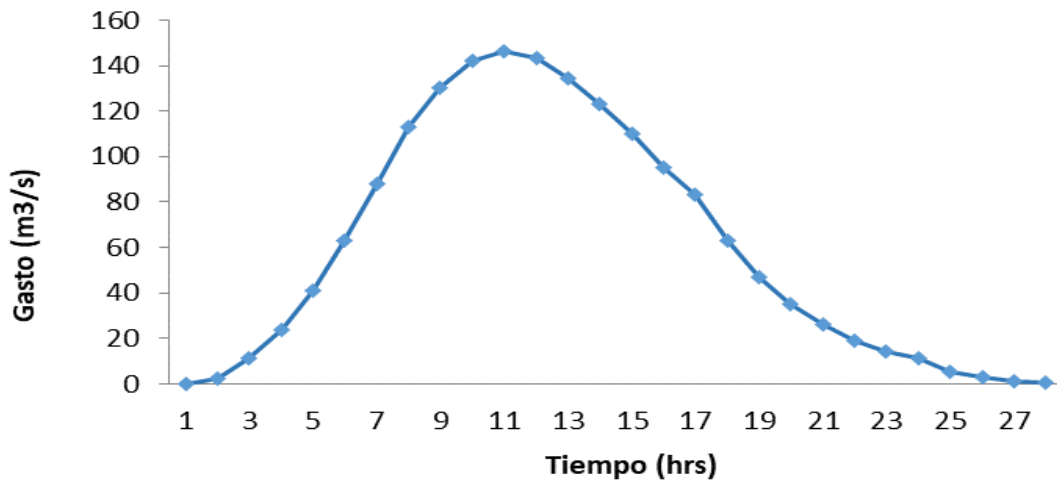


Figura 27. Escurrimiento directo a partir del hidrograma unitario sintético (HUS), de la cuenca del río Copalita, para un $Tr=1$ año

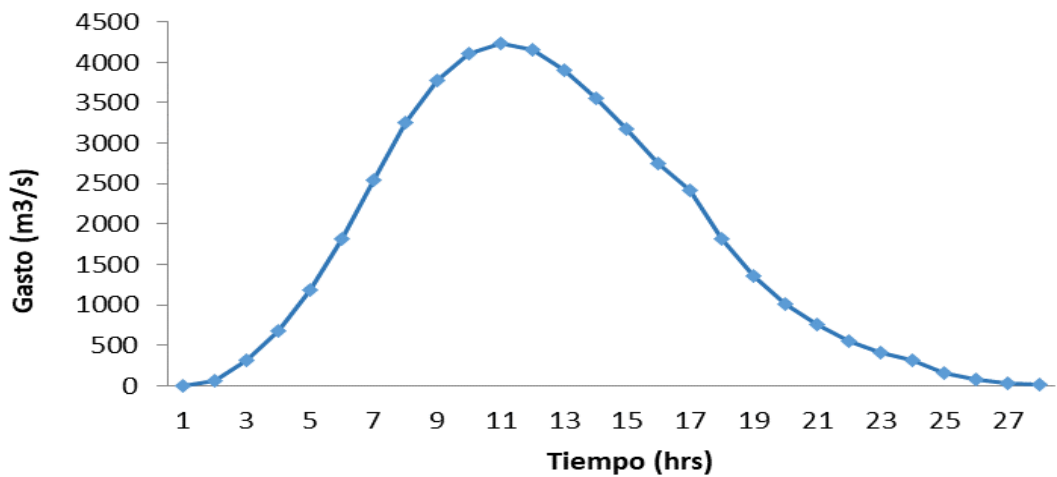


Figura 28. Escurrimiento directo a partir del hidrograma unitario sintético (HUS), de la cuenca del río Copalita, para un $Tr=100$ años

8.5 Determinación de la pluma de sedimentos e impacto en tasa de sedimentación

8.5.1 Cuantificación del índice de turbidez de la pluma de sedimentos formada en la desembocadura del río Copalita

De acuerdo al análisis de la varianza, la turbidez presentó diferencias significativas; los valores mas altos de turbidez se obtuvieron en la desembocadura del río Copalita con un promedio anual de 53 ± 50.10 NTU, en comparacion, la turbidez en Isla Montosa tuvo un promedio de 25 ± 25.82 NTU, mientras que en La Entrega registró la concentracion mas baja con un promedio de 13 ± 11.54 NTU ($F_{(2,30)}=5.01$, $P<0.005$, Anexo II, Fig. 29). Es decir, los resultados sugieren una disminucion de la turbidez con la distancia.

Por su parte, la turbidez en la columna de agua presentó diferencias significativas entre las temporadas ($F_{(2,30)}=1.25$, $P<0.005$, Anexo II, Fig. 30). La pluma de sedimentos del río Copalita mostró que los meses de lluvias presentaron los valores más altos con un promedio de 74.07 ± 66.51 NTU, mientras que la temporada de secas registro un promedio de 32.61 ± 8.23 NTU. En la desembocadura del río Copalita los meses con los valores más altos de turbidez fueron junio y septiembre, 193.23 NTU y 94.82 NTU y los más bajos fueron julio y diciembre con 10.55 NTU y 23.64 NTU. En Isla Montosa, los valores más altos de turbidez se registraron en época de lluvias con un promedio de 29.00 ± 36.19 NTU y en secas de 20.70 ± 10.67 NTU. Los valores más altos de turbidez se registraron en mayo (81.04 NTU) y junio (68.86 NTU) y los más bajos en agosto, con valores nulos de turbidez. De la misma manera en La Entrega los valores más altos se registraron en época de lluvias con un promedio de 14.44 ± 15.77 y en secas de 11.35 ± 6.14 NTU. Temporalmente los valores más altos de turbidez se registraron en el mes de junio con 35 NTU y los más bajos en agosto con registros nulos de turbidez. Finalmente, en la figura 31 y 32 se muestran los mapas de turbidez mensuales que representan las 3 localidades de estudio en el año 2017.

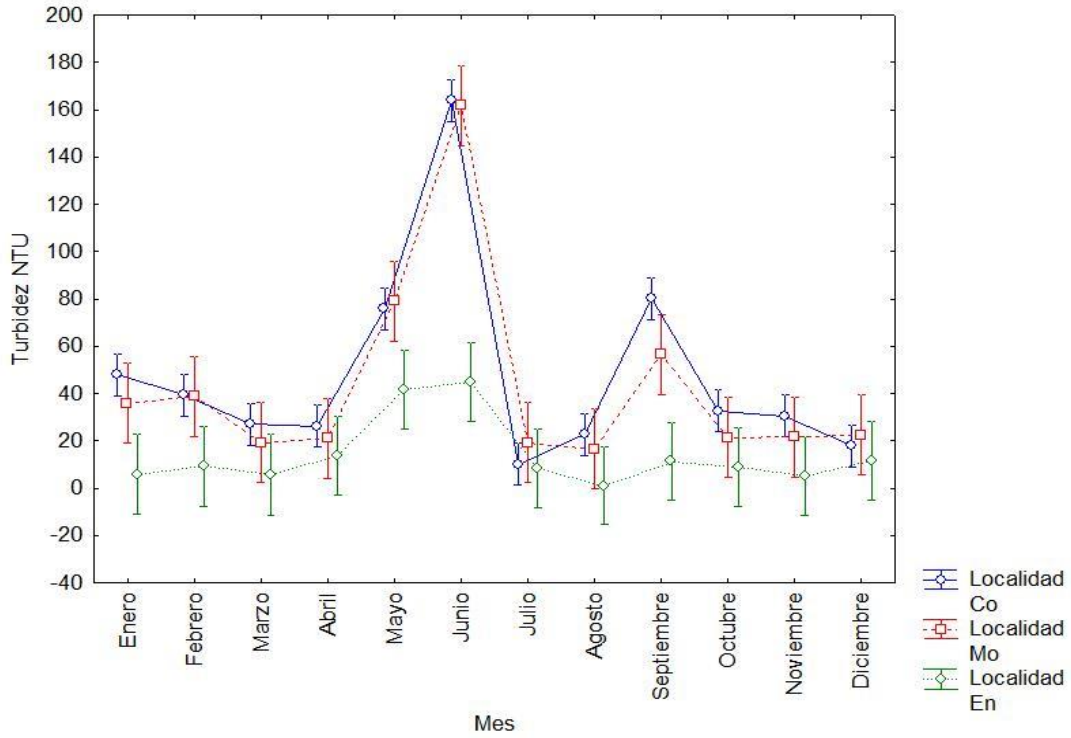


Figura 29. Media mensual de turbidez en La Entrega, Isla Montosa y Copalita derivado de imágenes MODIS-aqua durante el año 2017

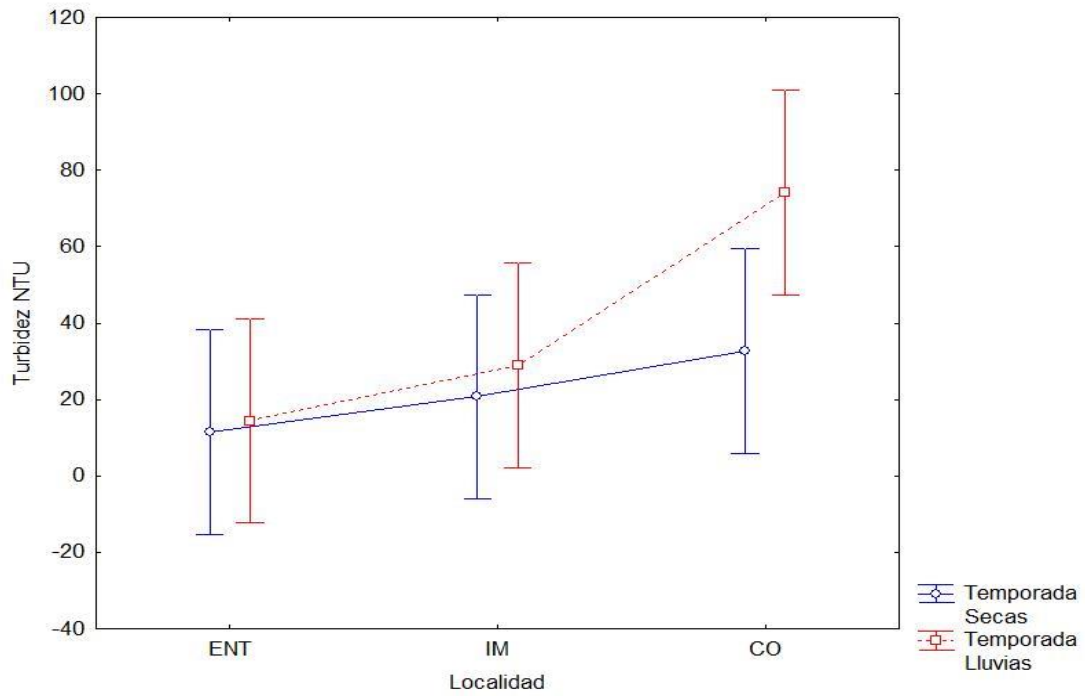


Figura 30. Variación de temporal de la turbidez en La Entrega, Isla Montosa y Copalita derivado de imágenes MODIS-aqua durante el año 2017

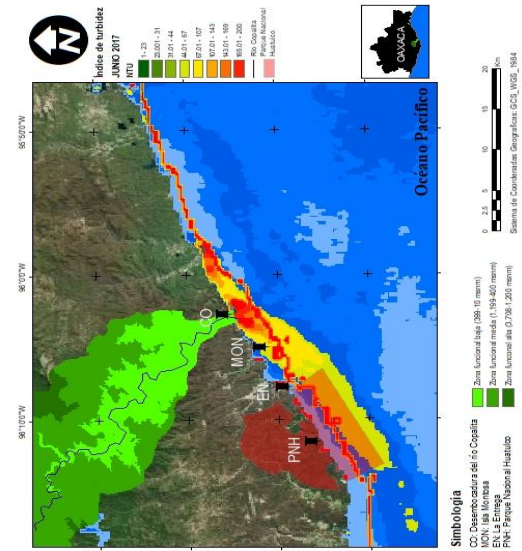
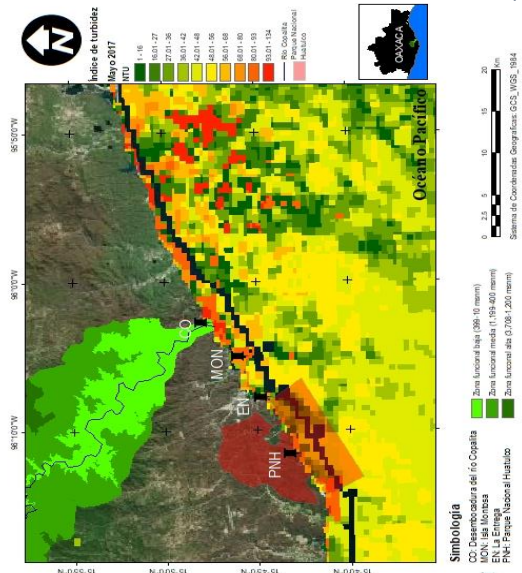
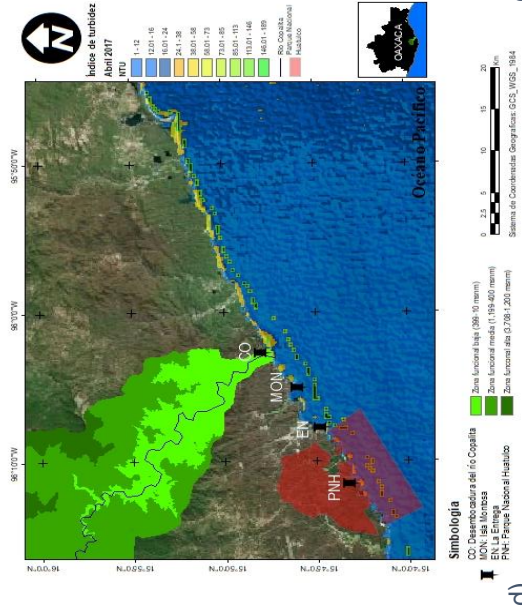
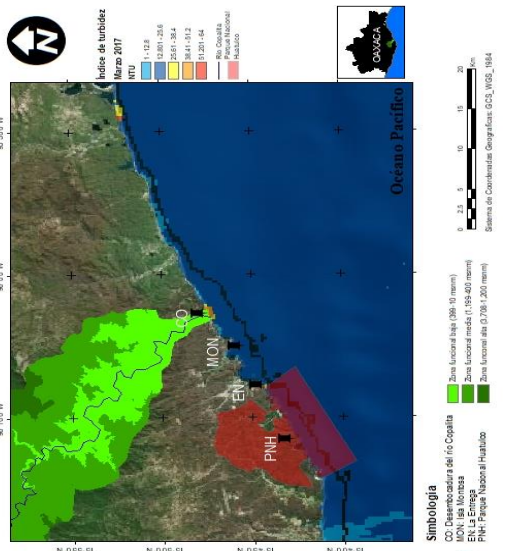
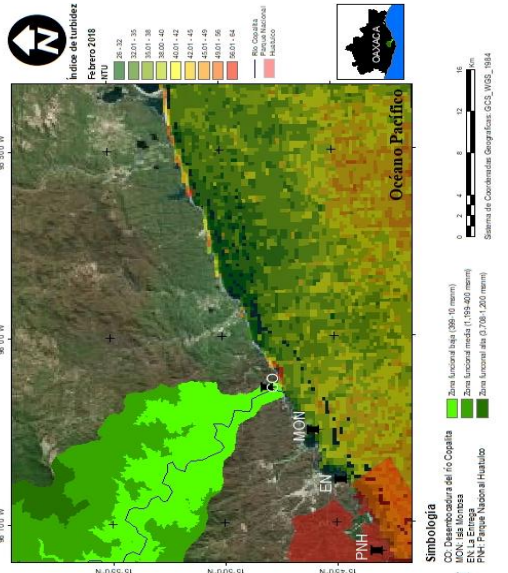
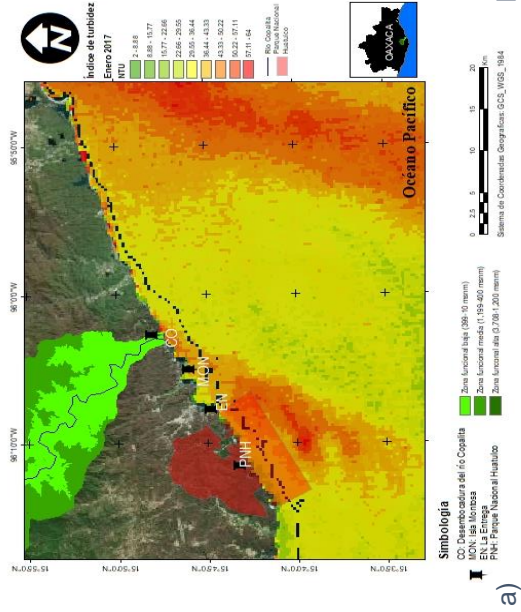


Figura 31. Mapas del índice de turbidez de la cuenca del río Copalita durante el año 2017. Resultado del compuesto de imágenes por meses: a) enero b) febrero c) marzo d) abril e) mayo f) junio.

El siguiente link de descarga te permite obtener los mapas de la pluma de sedimentos: https://drive.google.com/drive/folders/1F3rHDAuWlLQ_-i9DucPZQmpVYTbvR1J?usp=sharing

8.6 Determinación de tasas de sedimentación

El análisis de la varianza indicó que existieron diferencias significativas en las tasas de sedimentación entre las localidades de estudio ($F_{(1,75)}=68.22$, $p=0.000$; Fig. 33) y entre tiempos ($F_{(1,75)} = 25.20$, $p= 0.000$; Fig. 34). Entre sitios, Isla Montosa alcanzó tasas de sedimentación promedio significativamente más altas ($0.5587 \pm \text{DE mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), respecto a La Entrega ($0.1336 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$). Por su parte, la tasa de sedimentación en época de lluvias fue mayor con un promedio de $0.4993 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, mientras que en época de secas fue de $0.1875 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ (Fig. 35 y Anexo II). Los resultados obtenidos de la tasa de sedimentación muestran que octubre presentó la mayor cantidad de sedimento ($1.1787 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), mientras que febrero registró la menor tasa registrada ($0.0435 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$). Los resultados indican que el patrón de variación es más importante entre localidades que a nivel de escala temporal (Fig. 36 y Anexo III).

Además, la interacción resultó significativa ($F_{(1,75)} = 20.35$, $p= 0.00002$; Fig. 36) en espacio y tiempo; en general, la tasa de sedimentación fue significativamente más altas en Isla Montosa ($1.1787 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$) y La Entrega ($0.2114 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$) durante el mes de octubre de 2017. Se determinó una relación negativa de la turbidez NTU con respecto a la tasa de sedimentación ($r=-0.04$, $p<0.005$) (Anexo IV).

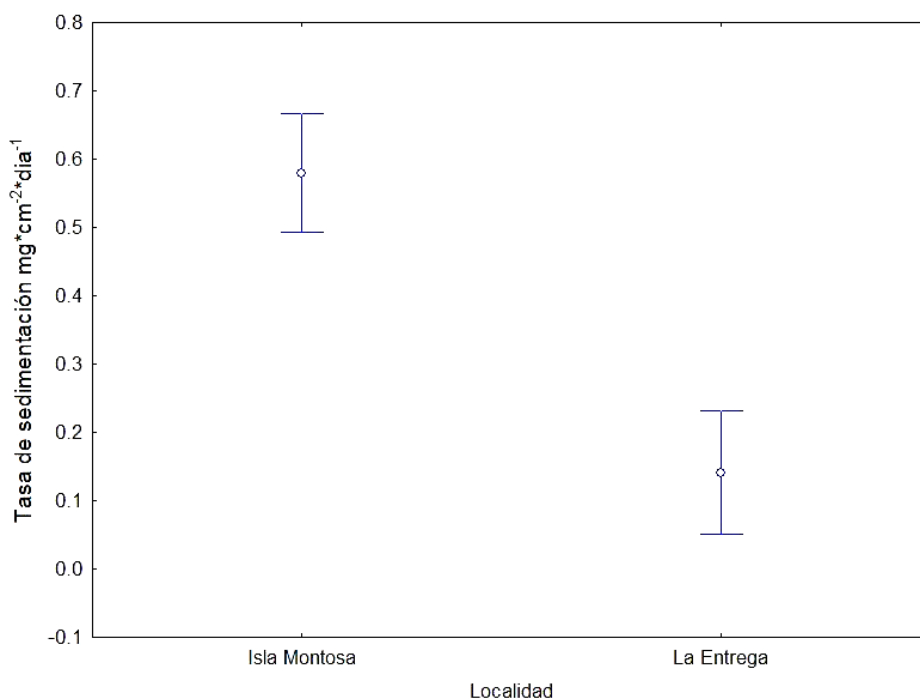


Figura 33. Tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega en el año 2017

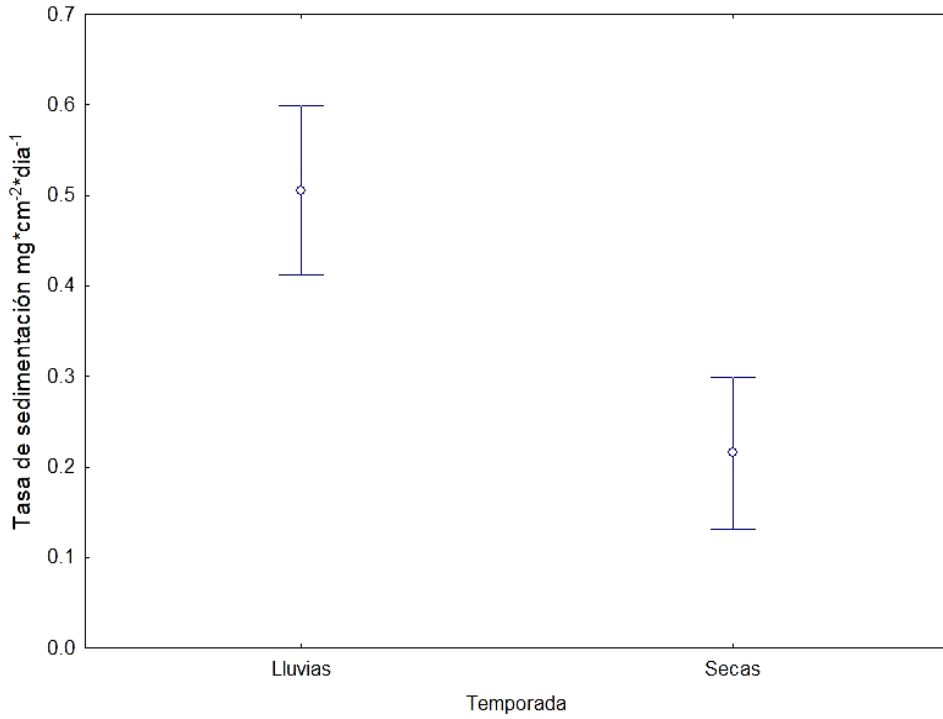


Figura 34. Variación temporal (lluvias y secas) de la tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega en el año 2017

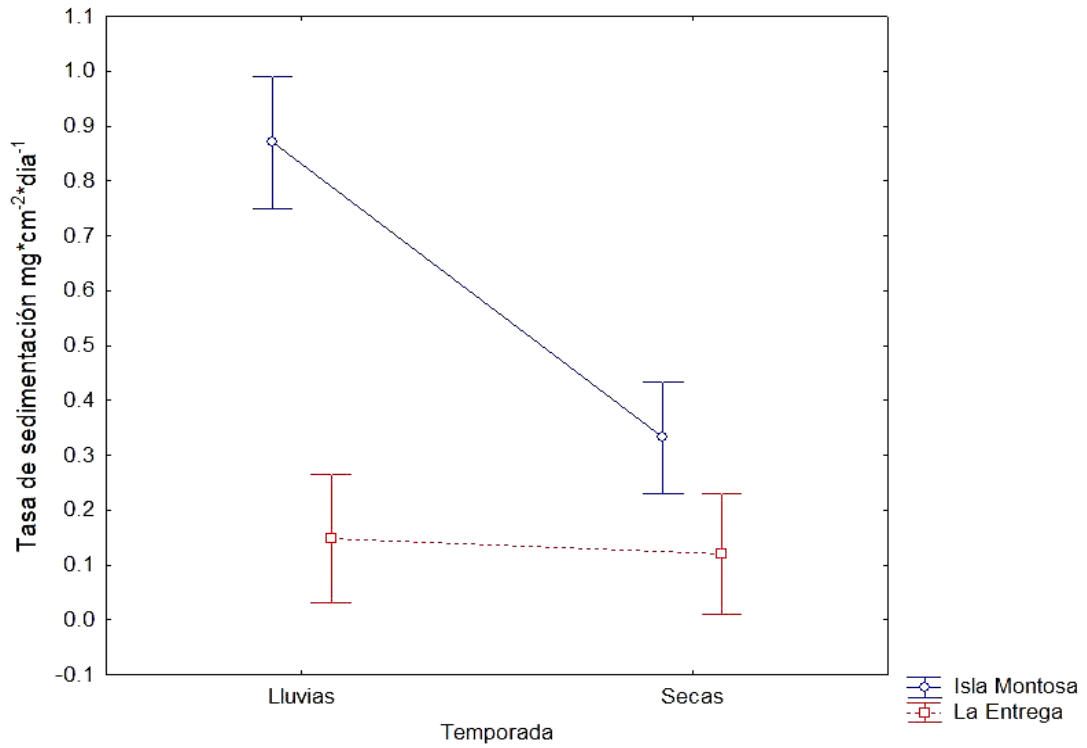


Figura 35. Relación espacio-temporal de la tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega

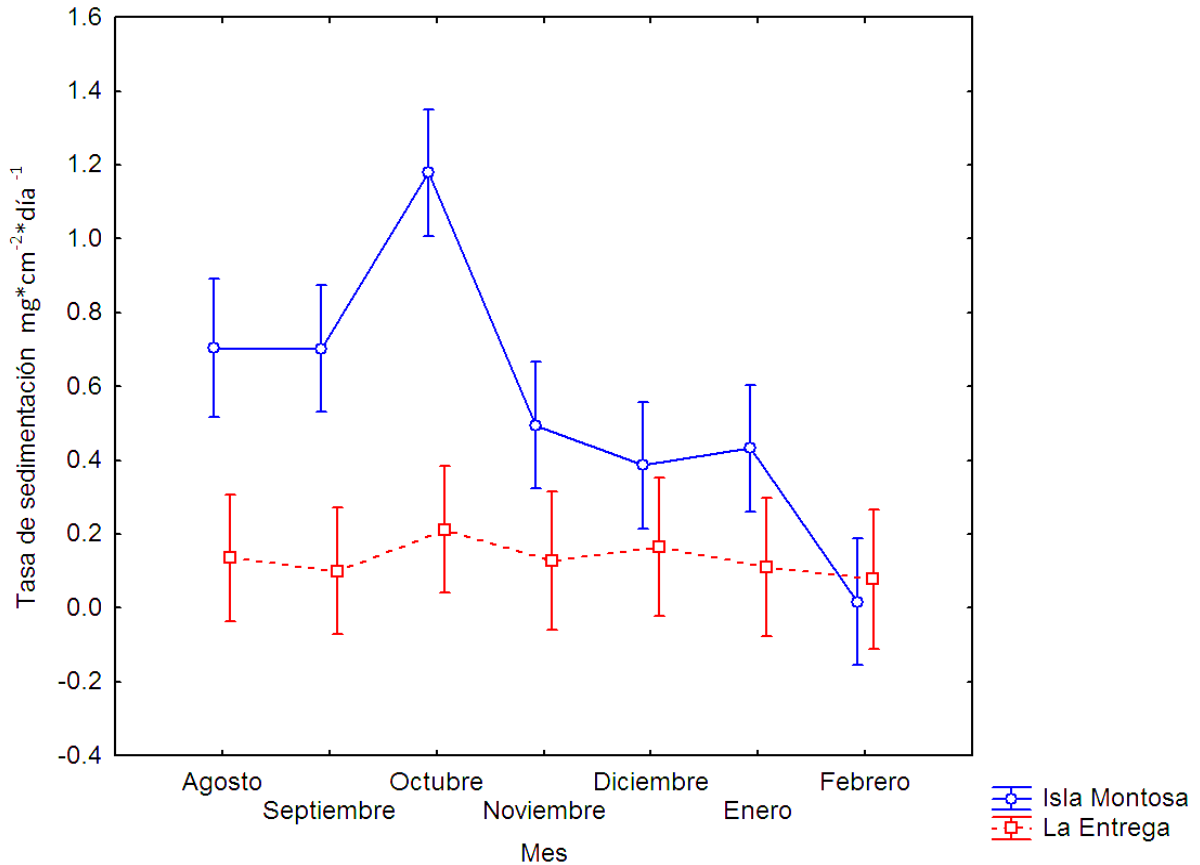


Figura 36. Variación de la tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega de agosto 2017 a febrero 2018.

9. Discusión

Se detectaron cambios de uso de suelo (CUS) del río Copalita para el año 2007, estos cambios representan pérdida de recursos forestales, causando un incremento de zonas erosionadas y un aumento en la pérdida de fertilidad del suelo, además de servir como proxy de las afectaciones potenciales a las comunidades marinas que se desarrollan en la zona costera. A pesar de la importancia ecológica y económica de los ecosistemas forestales en la cuenca, no existe un sistema de monitoreo de los CUS que permitan conocer sus causas, explicación y predicción, para generar una mejor planeación para conservar, restaurar y manejar los diversos y abundantes recursos forestales. Los CUS generan un impacto en la susceptibilidad del suelo, generando el desprendimiento de grandes cantidades de sedimento hacia los cauces de la cuenca del río Copalita. Se observó que la cobertura vegetal para el año 2017 está experimentando cambios en su estructura forestal, incrementando la superficie de los

bosques de coníferas-latifoliadas, quienes simultáneamente sufren procesos de sucesión secundaria, además del incremento de pastizales, asentamientos humanos y áreas destinadas a agricultura de temporal. El aumento de zonas urbanas del 2007 al 2017 fue de un 93,66%, su incremento se debe principalmente al aumento de la población, la demanda de infraestructura turística, así como el proceso de emigración, tal como lo indican Awasthi *et al.* (2002); Jokish (2002), Braimoh (2005), Rudel *et al.* (2005) y López *et al.* (2006). En el periodo de estudio, la cobertura de agricultura y pastizales es mayor a la determinada por Pérez-Vives (2017) en los años 2003 y 2013, como consecuencia del incremento de cultivos anuales y temporales, actividad que sustenta la economía de la población en la cuenca. El incremento de la mancha urbana conlleva a la realización de actividades, tales como la agricultura nómada, actividad que ocupa ciertas regiones de la cuenca para realizar cultivos temporales por periodos de 1 a 5 años que por el uso de agroquímicos disminuyen la fertilidad de la tierra y requiere de varios años para recuperarse. De acuerdo con el INEGI (2013), el nomadismo agrícola modifica los ecosistemas, hasta generar procesos de erosión que influyen en la degradación de bosques y selvas primarias, cubiertos por vegetación secundaria arbórea, susceptibles a transformarse en vegetación secundaria arbustiva, herbácea, sabanoide o suelo desnudo.

La cobertura de la agricultura de temporal permanente determinada durante el 2007 es inferior a la reportada por Pérez-Vives (2017) y Velázquez *et al.* (2002), quienes de acuerdo a sus resultados registran que la agricultura de temporal (TA), agricultura de temporal permanente (TP) y el pastizal inducido (PI) son los usos de suelo con mayor superficie en su estudio. Los resultados obtenidos para el 2017 muestran que el bosque mesófilo (BM) presentó una extensión de 217 ha, sin contar su crecimiento como vegetación secundaria, distribuido principalmente en la parte intermedia de la cuenca, atribuido a las condiciones geográficas (altitud, humedad y temperatura) y ecológicas de la cuenca (Luna *et al.* 2001). En este sentido, la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, presentan características orográficas que confieren particularidades a la cuenca que influyen en el transporte de sedimentos (Cavelier & Vargas, 2002; Manson, 2004). Las coberturas de BM determinadas coinciden con lo reportado por Torres (2004) y Ramírez (2014) para la Sierra Madre Sur en alturas de 1000 y 2500 msnm dominados por climas semicálidos y templados húmedos. La cobertura de BMM para el año 2017 difiere de la extensión reportada por Carcamo (2013) quien indica que está representada por un 11.93% de la superficie, con un total de 40,902 ha, distribuido en las subcuencas Copalita (75.62%), San Agustín Loxicha (9.92%), Candelaria Loxicha (9.65%) y Pluma Hidalgo (4.79%).

Los bosques y las selvas en cuenca del río Copalita disminuyeron su cobertura en superficie del 2007 al 2017 el 74% y 31.59 % respectivamente, Duran *et al.* (2014) determinaron que el porcentaje de bosques en 1979 en la cuenca fue del 41.3% y para las selvas un 37.7%. En cambio, para el 2000 cubrieron un 25.2% y un 27% respectivamente. De acuerdo con lo reportado por Pérez-Vives (2017) en el año de 1985 se registraron un total de 15,977 ha de bosque representado por un 10.38% de área en la parte alta de la cuenca, acompañado de BM/VSa con un 6.15% (9469 ha) y 5.92% (9105 ha) de BM/VSA. Así mismo Pérez-Vives (2017) reportó que en el 2003 el bosque mesofiló registró un total de 6,746 ha, coberturas que no presentan aumento para el 2013 (6,782 ha).

En el presente estudio se detectó que el BMM está siendo remplazado por bosques de coníferas y latifoliadas, actividades agrícolas y pastizales. Causado por la transformación a cultivos anuales y temporales, principalmente de árboles frutales, cortas y talas clandestinas, ganadería extensiva e incendios forestales (Carcamo, 2003). Finalmente, se considera que la pérdida neta en extensión de vegetación primaria de bosques y selvas es resultado del aumento de la vegetación secundaria arbórea y arbustiva, tal como lo menciona Velázquez *et al.* (2002) y Villareal (2011).

Los pastizales en la cuenca del río Copalita durante el año 2007 al 2017 fueron sustituidos principalmente por bosques de coníferas, como consecuencia de las actividades ganaderas que provocan el sobrepastoreo de grandes extensiones de pastos, condición aprovechada por las coníferas, al ganar mayor extensión. Este tipo de vegetación aprovecha la baja frecuencia de incendios forestales, para la distribución de propágulos a otras regiones de la cuenca (Cooper, 1961). Las coníferas aprovechan los canales de sequía y algunas regiones con una mayor altitud para ganar extensión (Granados-Sánchez & López-Ríos, 1998). La cobertura de pastizales se ha mantenido debido a que tienen una mayor capacidad adaptativa que los arbustos, asimismo la vegetación con mayor tejido vegetativo muestra mayores afectaciones a los incendios forestales, causando una destrucción por años. Los resultados difieren a lo reportado por Velázquez *et al.* (2002), Roldán & Sevilla (2014), Najera *et al.* (2010) y Osuna *et al.* (2015) quienes observaron que los pastizales se establecieron en regiones de bosques y selvas. En este contexto, coincidiendo con Pérez-Vives (2017) de 1985 al 2003 encontró que el 85% fueron transformados en cultivos, representados por 21,475 ha, así mismo el 85% de los cultivos se convirtieron en pastizales con un total de 6,488 ha. Esto implicó que se concentraran en otras regiones de la cuenca del río Copalita, por lo tanto, se considera importante realizar una reubicación de los polígonos, colocándolos entre la interface

con cuerpos de agua, debido a que investigaciones recientes resaltan que los pastizales funcionan como zonas buffer (ZB) (bandas de vegetación nativa o implantada ubicada pendiente abajo de cultivos o de instalaciones de producción animal), actuando como filtro de diferentes fuentes de contaminación del agua (Magette, *et al.*, 1989; Deng, *et al.* 2011), favoreciendo la retención de nutrientes y sedimentos (Osborne & Kovacic, 1993; Sabater, *et al.* 2003; Hoffmann, *et al.* 2009).

Los asentamientos humanos (AH) además de ganar cobertura, se establecieron en terrenos dentro de polígonos destinados a la agricultura, a su vez la población se encargó de deforestar bosques de perennifolias y subperennifolias, para su establecimiento (sectores rurales y urbanos). Los AH se distribuyen en los márgenes rivereños de los cuerpos fluviales (cauce del río Copalita), impulsando el vertido directo de material orgánico (ácidos húmicos y fulvicos), partículas sedimentarias en suspensión (arcillas y limos), aporte de iones y gases. Sánchez *et al.* (2014) mencionan que los desechos antropogénicos alteran la geoquímica del agua en el océano, principalmente en el aumento del pH y conductividad eléctrica. Así mismo el vertimiento de aguas residuales aumenta la concentración de partículas sedimentarias que se reflejan en el aumento de tamaño de la pluma de sedimentos. De acuerdo a los resultados obtenidos se determinó que los AH para el 2007 se establecieron en 57 ha. El estudio de Pérez-Vives (2017) registró un total de 109.6 ha en el 2013, incrementando el 0.71% para el 2017 con un total del 110.39 ha, registrado un incremento del 48.36% del año 2007 al 2017. De acuerdo con INEGI, en el 2011 se registraron un total de 140,000 habitantes que habitan en 289 comunidades rurales dispersas en la cuenca. En el municipio de Santa María Huatulco, Oaxaca se registran asentamientos en la desembocadura de la cuenca del río Copalita; a este respecto, Galicia *et al.* (2014) determinaron que la tasa de cambio (TC) de 1985 a 1995 fue de -1.0%, mientras que para este periodo 1995 al 2006 fue de -0.3% lo cual se atribuye al desarrollo de actividades agrícolas que se realizan de manera temporal y al desarrollo turístico (Figueroa-Jáuregui *et al.* 2011). El incremento de la mancha urbana genera la necesidad de aumentar las actividades agrícolas, empleando metodologías tales como: la quema (aumenta la fragilidad de los suelos), lo que aporta importantes volúmenes de sedimentos a los océanos (Gordillo-Ruiz *et al.* 2017). En un contexto general, las condiciones socioeconómicas y culturales de la población urbana y rural son determinantes en el tipo e intensidad de la degradación de los recursos naturales, por lo que afecta directamente la calidad (desechos antropogénicos) y el gasto de la cuenca, aportando grandes cantidades de sedimentos y material orgánico que influyen en los niveles de turbidez de la pluma de sedimentos, provocando su arrastre por el litoral oaxaqueño.

La tasa de cambio (TC) está asociada con la remoción de la cobertura vegetal, además de acelerar el proceso de erosión hídrica. En el estado de Oaxaca para el periodo de 1980-2000 se estimó una TC de -0.39% afectando principalmente los bosques de coníferas, coníferas-latifoliadas, latifoliadas y mesófilos, selvas altas perennifolias y subperennifolias, principalmente de origen primario. En la cuenca del río Copalita se registró un porcentaje de remoción de cobertura vegetal para el año 2007 de -0.65% (Duran *et al.* 2007), siendo superior a la media reportada a nivel nacional (-0.43%). Los cambios antes mencionados se mantuvieron para el año 2014, donde SAGARPA reportó grandes pérdidas de cobertura de bosques de pino y pino encino en distintos municipios (Ozolotepec, San Sebastián Río Hondo, San Miguel Suchixtepec, San Pedro El Alto) de la parte alta de la cuenca del río Copalita. Los cambios de cobertura vegetal influyen fuertemente en la transformación de los sistemas naturales, consecuencia del mal aprovechamiento, convirtiéndose en un efecto inherente de los asentamientos humanos, en conjunto con economía, ambiente y desarrollo (Lambin, 1997; Rosete *et al.* 2009; Bocco, 2007; Meyer & Tuner, 1994; Lambien & Geist, 2006).

Para la costa sur de Jalisco Nene *et al.* (2017) reportaron una TC en un rango del -0.3% al 0.6%, encontrándose dentro de lo reportado a nivel nacional (-0.43%) (Mas *et al.*, 2009; Rosete-Vergés *et al.*, 2014), además de presentar una similitud a tasa reportada para el Pacífico mexicano (Berlanga-Robles *et al.*, 2011; Nájera *et al.*, 2010; Osorio *et al.*, 2015). Los porcentajes de remoción de cobertura vegetal antes mencionadas, son menores a las reportadas por Kolb & Galicia (2012) para bosques tropicales secos en el sureste de México para el periodo de 1993 y 2007 (2.24%), por otra parte, Gordillo-Ruiz (2017) reporta el porcentaje más bajo (0.5%) para bosques tropicales secos, en la cuenca del río Sabinal, Chiapas. Las tasas de deforestación en las regiones tropicales de México, incluyendo la cuenca del río Copalita, son bajas y presentan alta vulnerabilidad como consecuencia del crecimiento poblacional (SEMAVI 2009).

La EUPS permitió identificar que la pendiente, el efecto de la precipitación y la susceptibilidad del suelo son los factores con mayor influencia en el proceso de erosión de la cuenca. La cuenca del río Copalita se caracteriza por relieves planos, ligeramente inclinados y ligeramente ondulados en la parte alta y baja, con pendientes que oscilan entre 0.1 a 7%, la región media se caracteriza por relieves ondulados e inclinados. El relieve de fuertes pendientes influye en los procesos de erosión muy fuertes, convirtiendo al factor LS en una variable determinante en el proceso de erosión hídrica. Lo anterior concuerda con lo observado por Castro (2012) en la microcuenca de Madín, la cual se encuentra dentro de los límites de

erosión fuerte, al presentar una pendiente media del 16.06% con una erosión potencial media anual de 166,6 ton/ha/año. En general, cuando los materiales desprendidos del suelo se encuentran en pendientes muy pronunciadas, son impulsados por la fuerza de gravedad, superando a la fuerza de cohesión, proceso que provoca el desplazamiento de partículas sedimentarias hacia la parte baja de la cuenca. Caso contrario a lo que sucede cuando las pendientes disminuyen, la presión es menor y como efecto secundario se transporta el sedimento removido a través del arrastre del agua (Valladares, 2004). El estudio de Pérez-Vives (2017), desarrollado en la misma área, presentó variaciones metodológicas en el factor LS debido a que solo consideró un solo vector con pendientes menores a 20°, dicho criterio influye en los resultados finales de erosión hídrica.

Para determinar el factor de erosividad se sugiere contar con una serie de datos con una diferencia no mayor a 20 años de registros de precipitación. Para el presente estudio se utilizaron datos de 1980 al 2008, por esta razón, disminuye la confiabilidad de dicho factor. El factor de erosividad determinado en la cuenca del río Copalita mostro valores altos en toda el área, debido a que se encuentra situada en una región hidrológica que registra anualmente altos valores de precipitación. Los valores registrados son muy altos con respecto a los reportados por Bueno-Hurtado *et al.* (2016) que van de 888.77 a 1,699.33 MJ*mm⁻¹*ha⁻¹*h⁻¹. Mientras que los registros de López-Santos *et al.* (2012) oscilan entre los 1,336.8 a 1,963.2 MJ*mm⁻¹*ha⁻¹*h⁻¹, muy cercanos a los registrados en la región sureste de la cuenca. La razón principal de la variación es debido a que se encuentran ubicados en una región hidrológica al norte del país, donde se registran mayor número de sequias.

La erosión anual determinada en el presente estudio es superior en el año 2007 con respecto al año 2017, debido a que ocurrió un proceso de recuperación de la vegetación primaria. Los valores determinados son superiores a lo reportados por Rial *et al.* (2003) en la cuenca del río Carballas, los autores consideraran que los cambios se deben a las actividades agrícolas y al cultivo (33.6% de extensión), sin embargo, existe una estabilización debido a la superficie forestal de bosques de pino y encino que protege a la cuenca del impacto causado por la precipitación.

Por otro lado, un aspecto muy importante en el estudio de las cuencas hidrográficas es identificar el tipo de suelo, Rial *et al.* (2003) confirmaron que las regiones con mayor cantidad de sedimento aportado en su cuenca del río Carballas, se encontraban cubiertas por matorral,

vegetación que facilita el desprendimiento de sedimentos, por lo tanto, las regiones donde aparece este tipo de vegetación coincide con las zonas más erosionadas, cabe agregar que se observa una relación directa con las zonas con mayor pendiente en la cuenca (Tabla XIII).

En el trabajo realizado por Carbajal & Giráldez (2000) se determinaron valores más altos de erosión que Rial *et al.* (2003) en donde las regiones al noroeste y sureste de la cuenca presentaron mayores procesos de erosión, que coincide con las regiones de mayor precipitación y mayor porcentaje de pendiente. Finalmente, los resultados obtenidos por Bueno-Hurtado *et al.* (2016) son similares a los registrados en este estudio en el 2007, dominando procesos de erosión de tipo fuerte (50-100 t*ha⁻¹) a muy fuerte (>200 t*ha⁻¹). Sin embargo, difieren a lo reportado para la cuenca del río Copalita en el 2017 debido a que la erosión dominante es de tipo leve, a consecuencia de la protección que brinda el bosque mesófilo de montaña y la selva mediana caducifolia al desprendimiento de sedimentos. Es importante mencionar que los resultados obtenidos en el estudio antes mencionado son similares a los reportados por otros autores en el estado de Durango en donde han reportado valores de 163 t*ha⁻¹*año⁻¹ (Tabla IX).

Tabla IX. Aporte de sedimento en los diferentes sistemas acuáticos

Aporte de sedimento	Sistema acuático	Autor
4.29 t/km ² /año	Carballas	Rial <i>et al.</i> 1994
2.46 t/ha/año erosión anual		
7.57x10 ⁵ t/año	Sistema hidrológico Cubillas-Colomera/ Región Cubillas	Carbajal & Giráldez 2000
3.88x10 ⁵ t/año	Sistema hidrológicos Cubillas-Colomera/ Región Colomera	Carbajal & Giráldez 2000
De 5 a >200 t*ha ⁻¹ *año	Subcuenca Agustín Melgar	Bueno-Hurtado <i>et al.</i> 2016

Después de conocer que en el 2007 en la cuenca del río Copalita, se observó que el proceso de erosión (fuerte) aportó en promedio entre 50-200 Ton*ha⁻¹-año⁻¹, se determinó que para el 2017 ocurrió un proceso de recuperación de vegetación, resultando en una disminución del proceso de erosión, como consecuencia del crecimiento de bosques de coníferas y latifoliadas.

La cuenca del río Copalita abastece de agua dulce a los asentamientos humanos que se distribuyen en la parte alta, media y baja, aunque también son beneficiadas las comunidades de bahías de Huatulco. Sin embargo, existe un fuerte problema en la parte media

y baja derivado la descarga de desechos antropogénicos sobre los cauces, los cuales fluyen hasta la desembocadura, para formar la pluma de sedimentos. La distribución de la pluma de sedimentos está controlada por procesos físico-químicos que a su vez llevan el sedimento hasta la superficie de los arrecifes de coral.

De acuerdo a los resultados espaciales obtenidos mediante el análisis de las imágenes satelitales, se observó que existe un gradiente desde la desembocadura del río Copalita hacia La Entrega, por lo que se puede considerar que entre menor es la distancia entre la desembocadura de la cuenca y los arrecifes de coral, existe mayor aporte de sedimentos. Así mismo se determinó que la pluma de sedimentos es influenciada por las corrientes litorales, sin embargo, al encontrarse ubicada en bahías de Huatulco y formar parte del Golfo de Tehuantepec (GT), se encuentra sujeta a la dinámica imperante de la zona, compuesta por características oceánicas cálidas que controlan el clima regional y en donde influyen las corrientes oceánicas que presentan un comportamiento estacional (caracterizado por la influencia de la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR), una corriente alimentada por la Contra Corriente Nor Ecuatorial (CCNE) y el Domo de Costa Rica (DC); Badán 1997, Brenes *et al.* 2008, Reyes-Hernandez *et al.* 2019) (Lavin *et al.* 1992). Además de estar acompañada de la existencia de dos épocas climáticas muy marcadas (lluvias y secas), proporcionando escenarios potenciales de estrés para las comunidades coralinas (Sakami, 2000). En el Pacífico Mexicano (PM) y el Golfo de Tehuantepec (GT), emergen dos corrientes superficiales que se asocian y alternan, la Corriente de California (CC) y CCNE (Reyes-Hernández *et al.* 2019). Específicamente los cambios en la circulación del POT están definidos por la intensidad y la localización del sistema principal de vientos (vientos Alisios del NE y SE), sujetos a fuertes corrientes de aire perpendiculares a la costa (Brenes *et al.* 2008).

En temporada de lluvias, la cuenca del río Copalita aportó mayor cantidad de material sedimentario, formando una pluma con mayor extensión, situación que coincide con lo reportado en otros sistemas estuarinos, debido al aporte de sedimentos de la región continental (Shiah *et al.*, 1996; Tapia & Naranjo, 2003. González & Fugate, 2008; Tapia-Bernitta, 2010; Romero-Gil, 2003). Los cambios de usos de suelo realizados en la cuenca aportan sedimentos debido a que aceleran los procesos de erosión y transporte de sedimentos (Larcombe *et al.* 1995; Carballo *et al.* 2008, Herrera-Escalante *et al.* 2005, Benítez-Villalobos *et al.* 2008; López-Pérez & López-López 2016). Los valores de turbidez en la pluma de sedimentos registraron un intervalo de 10.55 a 192.23 NTU, en Isla Montosa de 0 a 81.04 NTU y en La Entrega de 0 a 112 NTU, por lo tanto los registros en las dos últimas localidades, son

muy similares a los reportados en el Golfo de Gades (0.5 a 85 NTU), aunque son menores a los valores registrados por Fisher *et al.* (2007) para el estuario de Tasmania en Australia (0.1 a 352 NTU), quienes consideran que la alta turbidez es consecuencia de la precipitación pluvial. Los niveles de turbidez en las aguas costeras, también se encuentran influenciados por el efecto de marea, Bass *et al.* (2007) documentan que cuando la marea es alta, la concentración de sedimentos aumenta y viceversa. El análisis temporal realizado en el presente estudio indica que los valores más altos de sedimentación se registraron durante la época de lluvias, principalmente en octubre. Además, se tienen registros de dos tormentas tropicales durante el mismo año en el mes de junio: Beatriz y Calvin, con vientos de 75 km/h, un fenómeno que interviene en el aporte de sedimentos, como consecuencia de las descargas de aguas y desechos continentales.

Por su parte, durante la temporada de secas la pluma de sedimentos reduce su extensión, registrando un promedio de turbidez de 8.23 ± 32.61 NTU. No obstante, los sedimentos que se precipitan sobre la superficie de los corales pueden provenir también de la resuspensión de sedimentos del fondo a causa del viento (Arenas-Fuentes & Salas-Pérez 2005). Los cambios en la circulación del POT están estrechamente relacionados con la variabilidad de los vientos alisios de NE y SE (Brenes *et al.* 2008). En invierno, células continentales de alta presión invaden el Golfo de México, originando los vientos del norte fuertes, fríos y secos que soplan en la costa de Salina Cruz, así mismo en el margen occidental del GT, los vientos predominantes son del oeste (Reyes-Hernandez *et al.* 2019).

A este respecto, Katlane *et al.* (2010) señalan que la profundidad es determinante en el aporte o captación de sedimentos por el efecto de resuspensión debido al viento; de hecho, los autores evidencian que, específicamente en el cálculo del índice de turbidez, la profundidad es determinante en el efecto de reflexión del fondo. Por otra parte, Nehorai *et al.* (2013) mencionan que el oleaje es un factor importante en la remoción de sedimento, cuando el viento es superior a aproximadamente 4 m/s y las olas presentan una amplitud superior a 20 cm.

Los valores de sedimentación determinados en el presente estudio son comparativamente más bajos que los reportados por Granja-Fernández & López-Pérez (2008) en bahías de Huatulco para el año 2006. Los autores registraron valores de sedimentación de 6.8-73.5 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ durante temporada de secas, mientras que durante lluvias registraron 74.5-147.6 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$. Sin embargo, se considera que la diferencia en la tasa de sedimentación respecto al estudio antes mencionado, se debe a que hacía finales de agosto del año de estudio, se originó la onda tropical número 30 (28 de agosto 2006) que propicio la

formación del huracán John (localizado a 450 km al sur del Golfo de Tehuantepec y a 290 km al sur de Huatulco, Oaxaca), el cual origina vientos con rachas de hasta 90 km/h. También en ese mismo año se hizo presente el huracán Carlotta, originando vientos máximos de 140 km/h, además de formar una zona de convección con una importante entrada de humedad a los estados de Guerrero y Oaxaca, proporcionando fuertes lluvias (CONAGUA, 2006). Dicha información, coincide con el aumento de las tasas de sedimentación en los arrecifes de coral presentes en el área de estudio, debido a que generan procesos de resuspensión más acelerados, propicia descarga de desechos antropogénicos que se desplazan a través de las corrientes de agua generadas como consecuencia de las lluvias, además de aumentar el aporte de sedimentos por parte de la cuenca del río Copalita.

Concretamente, la dispersión de partículas y el transporte de sedimentos son elementos que se relacionan con la geomorfología de la zona costera y el patrón de vientos imperante en la costa chica de Oaxaca (Domínguez-Olivía 2016; Reyes-Hernandez et al. 2019). Así mismo, existen elementos suficientes que demuestran que la cercanía de los ríos y la precipitación pluvial contribuyen fuertemente en los incrementos de sedimento que llega a los arrecifes de coral presentes en bahías Huatulco, dicho argumento se confirma en el estudio de Cortés & Risk (1985) donde determinan que la cercanía del río La Estrella aumentó notablemente la tasa de sedimentación, situación que se logra observar en el presente estudio mediante una fuerte influencia por parte del río Copalita.

La comunidad arrecifal localizada en Isla Montosa registró la mayor tasa de sedimentación, pero también altos valores de turbidez por lo que se puede inferir que la concentración de partículas suspendidas en la zona es alta, dichas condiciones podrían representar un mayor riesgo potencial para la salud de los corales, en comparación con el riesgo que representan las condiciones que experimenta el arrecife La Entrega. En particular, el análisis realizado en la tasa de sedimentación asume que existen diferencias entre localidades y temporadas, así mismo, los arrecifes coralinos perciben mayor cantidad de sedimentos como consecuencia de la cercanía a la desembocadura de la cuenca del río Copalita.

La distribución de la pluma de sedimentos, así como la cantidad de sedimentos que llegan a los arrecifes coralinos de Isla Montosa y La Entrega, son determinantes para el mantenimiento de estos ecosistemas, debido a que pueden generar considerables cambios en la fisiología de los organismos así como pérdidas de cobertura. De acuerdo a los datos generados en este estudio Isla Montosa es la localidad que mayor presión de estrés presenta,

debido a los altos valores de sedimentación y turbidez. Así mismo, La Entrega también es impactada, pero en menor medida debido a que es una bahía que se encuentra protegida del oleaje, corrientes y además se encuentra más alejada de la desembocadura del río Copalita.

La causa principal de la mortalidad de corales en ambientes sometidos a una alta sedimentación es debido a que la cantidad de sedimentos que caen sobre la superficie, sobrepasan la velocidad de limpieza de los pólipos, lo cual ocasiona que los orificios de los pólipos sean cubiertos por sedimento, impidiendo captar alimento y expulsar los materiales de desecho, así como realizar el intercambio gaseoso, provocando ahogamiento y muerte de estos organismos. Sumando a esto, la reducción de luz como consecuencia de la alta turbidez afecta la relación simbiótica coral-microalga, dañando directamente procesos fisiológicos como reproducción y crecimiento (González (2010) y en casos más extremos ocasionando el blanqueamiento coralino (fenómeno en donde el coral expulsa las algas simbiotas las cuales son las principales fuentes de energía para el organismo; Iglesias-Prieto et al. 1992, Jordán 1993). Sin embargo, se ha demostrado que en otras regiones con valores altos de turbidez no siempre tienen tan drásticas afectaciones en la fisiología de los corales, encontrando reservas de lípidos cuatro veces superiores en arrecifes coralinos cercanos a la costa, en contraste con arrecifes de profundidades mayores (Anthony 2006). Así mismo, González (2010) sugiere que los efectos adversos de la sedimentación y turbidez sobre los arrecifes coralinos, actúan principalmente a nivel de población y comunidad y en menor medida a nivel fisiológico.

Se han realizado estudios sobre la fisiología de corales escleractinios en bahías de Huatulco, Oaxaca (Galván, 2010; Guendulain-García, 2010; Hernández, 2010). Estos estudios evidencian que los corales *Porites panamensis* de Isla Montosa genera mayor porcentaje de lípidos (17%), mientras que los corales de La Entrega producen un porcentaje que oscila de 12.6 a 14.2%, aun cuando en Isla Montosa se detectan altos valores de turbidez y sedimentación, se cree que los corales aprovechan los incrementos repentinos de irradianza, para generar un incremento en la concentración de lípidos destinados a la respiración y crecimiento como lo ha reportado Harland et al. (1992) en localidades del Caribe.

Isla Montosa, es una localidad que recibe grandes cantidades de materia orgánica en suspensión a causa del aporte de los ríos Copalita y Coyula, ocasionando altas tasas de sedimentación (aproximadamente 300 veces mayor comparada con localidades como San Agustín y Jicaral-Chachacual), provocando que los niveles de irradiancia disminuyan drásticamente (Granja-Fernández & López-Pérez, 2008). Sin embargo, la materia orgánica en suspensión provoca que las algas simbiotas experimenten procesos de fotoaclimatación,

tomando como reacción el aumento en la concentración de pigmentos, siendo una estrategia para satisfacer los requerimientos energéticos (Muscatine & Weis 1992, Iglesias-Prieto & Trench 1997, Maarittonera et al. 2002).

El aporte de materia orgánica durante la época de lluvias representa una posible fuente de nutrientes, componentes que en concentraciones menores, no producen la muerte de las colonias de coral, sin embargo, un incremento crónico en los niveles de nutrientes orgánicos disueltos puede alterar el metabolismo y el proceso de calcificación del arrecife, lo suficiente como para presentar cambios importantes en la comunidad (Fabricius, 2005). Por tales motivos, Isla Montosa es una localidad que se encuentra muy susceptible a sufrir distintos cambios en su composición y estructura arrecifal, como consecuencia de los factores de estrés que se generan cuando incrementan los nutrientes. Estos problemas no pueden ser descartados en la comunidad debido a la cercanía que tiene con la desembocadura del río Copalita y por los altos niveles de turbidez determinados durante el presente estudio. Es importante realizar acciones que fomenten la conservación del suelo, mediante el planeamiento y manejo agrícola, así como la protección de humedales costeros lo cuales ayudan a mitigar los impactos al filtrar sedimentos y nutrientes, evitando que se generen zonas de eutrofización en localidades de poco flujo.

La distribución batimétrica de corales es también una respuesta al estrés del ambiente superficial, a profundidades menores, la luz y la temperatura cálida son variables que influyen en el desarrollo óptimo de corales hermatípicos (como es en el sitio La entrega donde se encuentran colonias coralinas desde 1 metro de profundidad), condiciones que generalmente no se encuentran en comunidades cercanas a la desembocadura de los ríos, como es el caso que corresponde a Isla Montosa. En el caso específico de Isla Montosa se considera que el aporte de sedimentos incrementa fuertemente el grado de estrés de la comunidad arrecifal y por lo tanto su cobertura coralina se encuentra reducida, sin embargo, en el estudio de Díaz et al. (1996) menciona que pese a que en algunas regiones las aguas marinas reciben el aporte de descargas de agua dulce con sedimentos en suspensión, se ha posibilitado el desarrollo de estructuras arrecifales como es el caso de Isla Montosa.

En este punto, es importante resaltar que la descarga de sedimentos realizada en el río Copalita, está acompañada de una gran cantidad de contaminantes que provienen de las actividades agrícolas desarrolladas en la cuenca, causando un notable estrés a los arrecifes, poniendo en peligro la supervivencia de los corales juveniles debido a la pérdida de sustrato,

además de la muerte de colonias en casos extremos producidos por asfixia (Rosenfel *et al.* 1999).

Mientras que son evidentes los efectos de la sedimentación en los corales (Granja-Fernández & López-Pérez 2008), la turbidez presenta una relación inversamente proporcional con la biomasa de fitoplancton. Debido al aumento del material en suspensión, originan la atenuación de la luz en la columna de agua que limita la absorción de energía radiante proveniente de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) (Montes-Hugo & Álvarez-Borrego, 2005), así mismo, reduce la capacidad fotosintética de los microorganismos simbioses de los corales (García de Ballesteros & Larroque, 1976; Cloern 1987; Fisher *et al.* 2001; Romero-Gil 2003; Iriarte & Purdie 2004; Hernández & García 2007; Butrón *et al.* 2009 & Gadea-Pérez 2009), afectando la producción de los recursos energéticos necesarios para que el coral realice sus procesos fisiológicos.

La formación del esqueleto de los corales es un proceso que requiere de grandes cantidades de energía, obtenida en gran medida a partir de la simbiosis de los corales con dinoflagelados unicelulares fotosintéticos del género *Symbiodinium*, denominados zooxantelas (Jordán 1993, Karlson 1999). Así mismo, la simbiosis alga-coral consiste en el aprovechamiento de los desechos nitrogenados y el CO₂ producidos por el metabolismo de los corales. Gran parte del carbono fijado por las zooxantelas en la fotosíntesis se integra al coral en forma de glicerol, glucosa o alanina (Muscatine 1967, Harland *et al.* 1992, Muscatine & Weis 1992, Jordán 1993, Karlson 1999, Grottoll *et al.* 2004), mientras que el exceso de carbono fijado se integra a los tejidos del hospedero (coral) en forma de lípidos representando una importante reserva de energía.

En resumen, los resultados obtenidos sobre cobertura, deforestación y recuperación de bosques y selvas presentes en la cuenca del río Copalita, proveen de información relevante para la toma de decisiones, así mismo, permite analizar la situación de la biodiversidad. Además, la información generada ayuda a tener una mejor planeación regional, encaminada a la conservación de la cuenca y los ecosistemas interconectados. Los resultados obtenidos en el presente estudio son alentadores debido a que se registra un cambio benéfico en la cobertura de vegetación entre el año 2007 y 2017. Sin embargo, la cuenca registró una tasa anual de deforestación mayor a la estimada a nivel estatal y nacional (-0.65%, -0.39% y -0.43%, respectivamente; Velázquez *et al.* 2002), siendo un problema que influye en el aporte de sedimento a los cauces del río Copalita, debido a la pérdida de resistencia del suelo. Dicha región no parece ser tan crítica, ya que su tasa de deforestación estuvo por debajo de lo

reportado para los bosques de la región de la Sierra Norte, donde las tasas anuales fueron superiores al 1% (Gómez-Mendoza *et al.* 2006). En el presente estudio resultó evidente la importancia de generar la información vectorial correspondiente a todas las prácticas de conservación realizadas en la actualidad, necesaria para nutrir la ecuación universal de pérdida de suelo. Donde deben considerarse los esfuerzos realizados por algunos pobladores quienes efectúan actividades de conservación que reducen los problemas causados por erosión del suelo, sin embargo, un problema muy común es que dichas áreas no son declaradas oficialmente como áreas destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC), propuestas con la finalidad de conservar su riqueza biocultural, a partir del manejo y protección, por tales motivos, es importante que las dependencias gubernamentales registren los polígonos en donde se desarrollan dichas actividades, permitiendo tener una mejor estimación de los resultados obtenidos a través del modelo utilizado (EUPS). Finalmente, las actividades realizadas en pro de la conservación de la cuenca de río Copalita, tendrán un efecto importante en la disminución de sedimentos aportados como consecuencia de los cambios de usos de suelo. Así mismo, se reducirá la cantidad de sedimento que llega al océano y que posteriormente es distribuido por las condiciones imperantes causadas por la cercanía con el Golfo de Tehuantepec. Donde una gran cantidad de sedimentos cae sobre la superficie de los arrecifes de coral, quienes responden fisiológicamente ante las variaciones ambientales.

10. Conclusiones

- La agricultura y los pastizales son los usos de suelo que remplazaron mayor cantidad de polígonos de coníferas y bosque mesófilo de montaña, quienes representan un 50% del total de los cambios, siendo favorable al reducir los niveles de erosión en la cuenca del río Copalita.
- Se observó que en el año 2007 los procesos de erosión que dominaban en la cuenca eran muy fuertes (en toda la cuenca), debido a cantidad de polígonos destinados a la agricultura y pastizal inducido.
- Para el año 2017 los procesos de erosión que dominaron en la cuenca eran muy fuertes, sin embargo, para el mismo año aumentaron en un 30% el tipo de erosión leve, debido al crecimiento de bosques de coníferas y latifoliadas.
- Los procesos de erosión de tipo leve y moderado del año 2007 al 2017 aumentaron un 20%, la cuenca se encuentra en un proceso de recuperación de vegetación de bosques y selvas que permiten la retención de sedimentos, por lo tanto disminuyen los procesos de erosión.
- La tasa de sedimentación en Isla Montosa muestra una tendencia a ser superior, en comparación con bahía La Entrega.
- La tasa de sedimentación en Isla Montosa y bahía La Entrega fue superior en ambas localidades específicamente en temporada de lluvias.
- La dinámica de pluma de sedimentos formada en la desembocadura del río Copalita, se encuentra determinada por la temporalidad de corrientes que dominan el Pacífico Oriental Tropical, los eventos de precipitación y los escurrimientos de agua acompañados por desechos antropogénicos

11. Referencias

- Abdel-Salam, H., J. Potter & B. Hatcher. 1988. Physiological effects of sediment rejection on "Photosynthesis and respiration in three Caribbean reef of coral. Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium. Townsville, Australia 2:285-292.
- Abel, B.P. 2018. Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales. UNIR. 473 pp.
- Acevedo, R. & J. Morelock. 1988. Effects of terrigenous sediment influx on coral reef zonation in southwestern Puerto Rico. Proceedings 6th International Coral Reef Symposium, 2: 92-100.
- Aller, R.C & R.E. Dodge. 1974. Animal-sediments relations in a tropical lagoon, Discovery Bay, Jamaica. Journal of Marine Research 32:2009-232.
- Almazán, & V. Arenas-Fuentes. Ed. Econatura & CONABIO, México, 7–21 pp.
- Anthony, K., S. Connolly & O. Hoehg-Guldberg. 2007. Bleaching, energetics, and coral mortality risk: Effects of temperature, light, and sediment regime. Limnol. Oceanogr., 52, 716-726.
- Arenas-Fuentes, V., & J. Salas-Pérez. 2005. El Golfo de México, una aproximación a los determinantes de su biodiversidad. In: Camarones, langostas y cangrejos de la costa este de México (J. L. Hernández Aguilera, J. A. Ruiz Nuño, R. E. Toral Almazán and V. Arenas-Fuentes, Eds.) Econatura and CONABIO, México, 7-21.
- Awasthi, K., B. Sitaula, B. Singh & R. Bajacharaya. 2002. Land-use change in two Nepalese watersheds: GIS and geomorphometric analysis. Land Degradation & Development 13(6): 495-513.
- Badock, R & C. Muddy. 1996. Coral recruitment: consequences of settlement choice for early growth and survivorship in to Scleractinians. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 206:179-201.
- Benítez-Villalobos, F., M.T. Domínguez-Gómez & R.A. López-Pérez. 2008. Temporal variation of the sea urchin *Diadema mexicanum* population density at bahías de Huatulco, western Mexico. Rev. Biol. Trop. 56(3): 255–263.
- Berlanga-Robles, C. A., A. Ruiz-Luna, O. Covarrubias-Legaspi & R. Hernández-Guzmán. 2011. Esgurrimiento en la Cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: Una aproximación con el modelo del número de curva. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63(1), 39-52.

- Braimoh, A & P. Vlek. 2005. Land Cover Change Trajectories in Northern Ghana. *Environmental Management* 36: 356-373.
- Bueno-Hurtado, P., V. M. Velásquez., A. López., I. Sánchez & B. Gonzáles. 2016. Implementation of a model to estimate water erosion with distributed parameters applied to watersheds. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 15(1), 47-54.
- Burke, L & J. Maidens. 2005. *Arecifes en Peligro en el Caribe*. World Resources Institute (Instituto de Recursos Mundiales, WRI), Washington,DC.
- Butrón A., A. Iriarte & J. Madariaga. 2009. Size-fractionated phytoplankton biomass, primary production and respiration in the Nervión-Ibaizabal estuary: A comparison with other nearshore and estuarine ecosystems from the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 29, 1088-1102.
- Calzadilla. P,A., M. C. J. Damen & D. Geneletti. Monitoreo de la formación de un delta en un humedal costero tropical que utiliza herramientas de percepción remota y SIG. *Development and Sustainability* 4: 201-219.
- Camargo,C., R. Vidal & J. Andrades. 2014. Evaluación multitemporal de procesos de erosión en ladera mediante uso de SIG y sensores remotos en la micro-cuenca torrencial “La Machiri” estado Táchira-Venezuela. *Rev. Geográfica Venezolana* 55 (1): 85-99.
- Camargo-Hernández J.E. & V. Franco. 2010. Aforo de sedimentos En UNESCO Programa Hidrológico Internacional, 75-91 pp.
- Carballo, J., E. Bautista-Guerrero & G.E. Leyte Morales. 2008. Boring sponges and the modeling of coral reef in the east pacifico ocean. *Marine Ecology*. 356:113-122
- Carvajal, R. & J. Cervera. 2000. Análisis de la producción de sedimentos en una cuenca con un sistema de información geográfica. El sistema Cubillas-Colomera. *Ingeniería del agua* 7(3): 225-236.
- Caso, M & A. Garrido. 2010. *In: Cotler,H. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México, D.F. 162-168.
- Cloern, J. E. 1987. Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Continental Shelf Research*. 7: 1367-1381.

- COBINABE. 2010. Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Bonacional del Río Bermejo. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. Buenos Aires. 230 pp.
- Cole, E. B & J. Cloern. 1987. An empirical model for estimating phytoplankton productivity in estuaries. *Marine Ecology Progress Series*. 36: 299-305.
- CONAGUA. Resumen del huracán Carlotta del Océano Pacífico. 2006. 3 p.
- Cortés, N. J & M.J. Risk. 1985. El arrecife coralino del Parque Nacional Cahuita, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 32:109-121
- Cotler-Ávalos H., A. Galindo-Alcántar., I. D. González Mora., R. Pineda-López & E. Ríos-Patrón. 2008. Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. SEMARNAT. México, D.F. 1-31 pp.
- Díaz, D. A. 2017. Sedimentación en arrecifes coralinos del corredor Puerto Ángel-bahías de Huatulco, Oaxaca, México Tesis de licenciatura. Universidad del Mar Campus Puerto Ángel.
- Durán, E., F. Gopar, A. Velázquez, F. López, A. Larrazabal & C. Medina. 2007. Análisis de Cambio en las Coberturas de Vegetación y Usos del Suelo en Oaxaca. II Simposio de Biodiversidad de Oaxaca, CIIDIR-Oaxaca, IPN, Oaxaca, México.
- Durán, C.L., O.F. Escolero., E. F. M. Muñoz., M.C.S. Castillo., G.S.R. Rodríguez. 2014. Cartografía geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas (México): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (2), 263–277.
- Figuroa-Jáuregui, M., , L. Ibáñez., R. Arteaga., L. Arellano & M. Vázquez. 2011. Cambios de uso de suelo en la cuenca de San Cristobal de las Casas, México. *Agrociencia*. 45:531-544.
- Fischer, A., D. Pang., I. Kidd & M. Moreno. 2017. Spatio-temporal variability in a turbidity and dynamic tidal estuarine environment (Tasmania, Australia): An assesment of MODIS band 1 reflectance. *Geo Inf*.6:320
- Fisher, J. S. 2011. Crustaceous Zooplankton Transfer between a Flood plain Wetland and the Missouri River. *The Prairie Naturalist*. 43(1/2):14-22.
- FONATUR, 1986. Desarrollo turístico, bahías de Huatulco, Oaxaca. Plan maestro de las bahías centrales, Santa Cruz, Chahué y Tangolunda. Memoria descriptiva, México, 56 p.

- Foster, G.R. & L.D. Meyer. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanism. USDA-ARS-S-40: 190 p.
- Gadea-Pérez, I. 2009. Variación espacial del fitoplancton en la zona costera de Gandía y su relación con la entrada de nutrientes. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. 145 pp.
- Galicia, L., M. Cuevas., L. Merit & S. Couturier. 2014. Detección del cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*. 39: 6
- Galvis, M.D.X. 2008. Estimación de la generación de sedimentos de la cuenca hidrográfica del Río Sisga con base en la ecuación universal de pérdida de suelo. Universidad de la Salle, Bogotá.
- García de Ballesteros, G. & M. Larroque. 1976. Elementos sobre la distribución de turbidez en el Alto Golfo de California. *CalCOFIREp*. XVIII: 81-108 pp.
- García, C. S. 2005. Estudio teórico y experimental de la remoción hidráulica de sedimentos en un embalse. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos.
- Gaulet, T.L., 2006. Most corals may not change their symbionts. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 321: 1-7.
- González, L. M. & D. Fugate. 2008. Distribución de sedimento suspendido en el estuario del Río Passaic. *Tecnociencia*. 10 (1): 63-72.
- Gordillo-Ruiz, M.C & M. A. Castillo-Santiago. 2017. Cambio de uso de suelo en la Cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosist. Recur. Agropec*. 4 (10):39-49.
- Granja, F. M. R & R.A. L". Pérez. 2008. Sedimentación en comunidades arrecifales de bahías de Huatulco, Oaxaca, México. *Rev. Biol. Trop* 56 (3): 1179-1187.
- Groisman, P., R. Knight & T. Karl. 2012: Changes in intense precipitation over the central United States. *J. Hydrometeor.*, 13, 47–66.
- Hernández, A. J. S & J. L. C. García. 2007. Diferencias limnológicas entre lagos y presas. In: Arredondo, F. J. L. Díaz y J. T. P. Ponce. *Limnología de presas mexicanas. Aspectos teóricos y prácticos*. AGT Editor, S. A. y Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México. 63-74 pp.

- Herrera-Escalante, T., R.A. López-Pérez & G.E. Leyte-Morales. 2005. Bioerosion caused by the sea urchin *Diadema mexicanum* (Echinodermata: *Echinoidea*) at bahías de Huatulco, western
- Hodgson, G. 1990. Sediment and settlement of larva of the reef coral *Pocillopora damicornis*. *Coral Reef* 9:41-43.
- Hubbard, D.K. 1987. A general review of sedimentation as it relates to environmental stress in the virgin Islands Biosphere Reserve and the Eastern Caribbean in general. Biosphere reserve research report no. 20. National Park Service. Islas vírgenes, EEUU.
- Iriarte A. & D.A. Purdie. 2004. Factors controlling the timing of major spring Bloom events in a UK south coast estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 679-690.
- Jokish, B. 2002. Migration and agricultural change: The case of smallholder agriculture in Highland Ecuador. *Human Ecology* 30(4):523-550.
- Jordán-Dahlgren, E. 1989. Efecto de la morfología del sustrato en el desarrollo de la comunidad coralina. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Auton. México* 16: 105-117.
- Katlane, R., B. Nechad., K. Ruddick & F. Zargouni. 2010. Optical remote sensing of the Gulf of Gabes-relation between turbidity, secchi depth and total suspended matter. *OSD.7*: 1767-1783.
- Kench, P. S., R. W. Brander, K. E. Parnell & R. F. McLean. 2006. Wave energy gradients across a Maldivian atoll: Implications for island geomorphology, *Geomorphology*, in press
- Kolb, M & L. Galicia. 2012. Challenging the linear forestation narrative in the Neo-tropic: regional patterns and processes of deforestation and regeneration in southern Mexico. *The Geographical Journal* 178: 147-161.
- Lambin, E., F. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 1997; 21 (3): 375-393.
- Lambin, E.F. & H. Geist. 2006. Land-use and land-cover change: local processes and global impacts. Springer, Berlin, Alemania. 204 p.
- Larcombe, P., A. Costen & K.J. Woolfe. 2001. The hydrodynamic and sedimentary setting of nearshore coral reefs, central Great Barrier Reef Shelf, Australia: Paluma Shoals, a case study. *Sedimentology* 48: 811-835.

- Legorreta, G.P., M. Bursik, J.J. Zamorano, J. Lugo, B. Martinez-Hackert & J.V. Bajo. 2016. Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Investigaciones Geográficas*. 92
- Lirman, D., P.W. Glynn., B.C. Baker & G.E. Leyte-Morales. 2001. Combined effects of three sequential storms on the Huatulco coral reef tract. *Bull. Mar. Sci.* 69: 267–278
- López, E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velázquez & R. Aguirre. 2006. Peasant emigration and land use change, *Agricultural Systems*, no. 90, pp. 62-78.
- López-Pérez, R.A & D.A. Lopez-López. 2016. Impacto bioerosivo de *Diadema mexicanum* en arrecifes de coral del Pacífico sur mexicano. *Ciencias Marinas* 42(1):67-69
- López-Santos, A., C.I. Sánchez., A. G. Esquivel & B. J. L. González. 2012. Evaluación de la vulnerabilidad de los suelos de estado de Durango, México en el contexto del cambio climático. *Agrociencia Uruguay, Special Issue*, 6 (3), 117-127.
- Mas J.F., A. Velázquez & S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental. Ciencia y política pública*. p. 23-39.
- Medina, S.L., G.M. Anaya., H.V. Volke & C.S. Ortiz. 2005. Formulación de un plan de desarrollo agropecuario y forestal para una comunidad ejidal del municipio de San Fernando, Chiapas, México. *Mundo Agrario* 5: 1374-1405.
- Meyer, L.D & W.H. Weischmeier. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE* 12: 754-758.
- Meyer, W.B. & B.L. Turner. 1994. *Changes in Land Use and Land Cover: a Global Perspective*. Cambridge University Press. 538 pp.
- Moberg, F & C. Folke. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*. 29: 215-233.
- Molina, L.M. 2013. Análisis del estado de salud de los arrecifes coralinos del Pacífico Mexicano. Ensenada, Baja California, México. Tesis doctoral.
- Morán-Zenteno, D. J. 1992. Investigaciones isotópicas de Rb-Sr y Sm-Nd en rocas cristalinas de la región de Tierra Colorada-Acapulco-Cruz Grande, Estado de Guerrero: México, D.F.,

- Universidad Nacional Autónoma de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, Tesis doctoral, 186 p.
- Morelock, J & K.J. Koenig. 1967. Terrigenous sedimentation in a shallow water coral reef environment. *J. Sediment. Petrol.* 37: 1001-100.
- Morelock, J & B. Taggart. 1988. USA-Puerto Rico in Walker, H.J., ed. *Artificial structures and shorelines*: New York, Kluwer Academic Publisher, 6-21 pp.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton., R.E. Smith., G. Govers., J.W.A. Poesen., K. Auerswald., G. Chisci., D. Torri., M.E. Styczen & A.J.V. Folly. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College. Cranfield University. <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/eurosem/euro3.htm>
- Muñiz-Anguiano, D., M. Verduzco-Zapata & M.A. Liñán-Cabello. 2017. Factores asociados a la respuesta de *Pocillopora* spp. (Anthozoa: Scleractinia) durante un proceso de restauración en la costa del Pacífico mexicano. *Revista de biología marina y oceanografía*, 52(2), 299-310
- Nájera, O., J.I. Bojórquez-Serrano., J.L. Cifuentes-Lemus & S. Marceleño-Flores. 2010. Cambio de cobertura y uso de suelo en la cuenca del Río Molola, Nayarit. *Rev. Biociencias* 1(1):19-29.
- Nehorai, R., N. Lensky, L. Hochman & I. Lensky. 2013. Turbidity of the Dead Sea surface-observations from remote sensing: A study for the salt recovery project. Bar Ilan University. Geological Survey of Israel.
- Nené, P. A., G. González., M. Mendoza & F. Silva. 2017. Cambio de cobertura y uso de suelo en cuencas tropicales costeras del Pacífico central mexicano. *Investigaciones Geográficas*.
- Nybakken, J.W. 1993. *Marine biology: an ecological approach*. Harper, Nueva York, EEUU.
- Obura D. 2009. Reef corals bleach to resist stress. *Marine Pollution Bulletin* 58(2): 206-212.
- Olaya, V. 2011. *Sistemas de información geográfica*.
- Ortega-Gutiérrez, F. 1981. Metamorphic belts of southern México and their tectonic significance: *Geofísica Internacional*, 20(3), 177-202.

- Osorio, L. P., J.F. Mas., F. Guerra & M. Maass, M. 2015. Análisis y modelación de los procesos de deforestación: un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, 88, 60-74.
- Osuna, Osuna A. K., J. J. Díaz-Torres., J. De Anda-Sánchez., E. Villegas-García., J. Gallardo-Valdez. & G. Davila-Vazquez. 2015. *Rev. Ambiente y agua*. Vol. 10. Núm. 2. pp. 350-362.
- Palomera, L. I & J. Salat. 2002. Impacto de los caudales fluviales sobre los ecosistemas pelágicos. Instituto de Ciencias del Mar CMIMA-CSIC. 37-49.
- Pérez-Nieto, S., J.L. Arellano-Monterrosas., L.A. Ibáñez-Castillo & F.R. Hernández-Saucedo. 2012. Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México 30(2): 103-110
- Pérez-Vives, E. 2017. Propuesta de manejo para mitigar la erosión hídrica en la cuenca costera del río Copalita, Oaxaca. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Pethick, J. 1984. *An introduction to coastal geomorphology*. London: Edward Arnold.
- Philip, E & K. Fabricius. 2003. Photophysiological stress in scleractinia corals in response to short-term sedimentation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 287:57-78
- Philipp, E. & K. Fabricius. 2003. Photophysiological stress in scleractinian corals in response to short-term sedimentation, *Journal of experimental marine biology and ecology*, 287 , pp. 57-78
- Pizarro, R.T., C. Ramirez & J.P. Flores. Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en periodos extremos. *Rev. BOSQUE* 24(3):31-38
- Pontius, R. G., E. Shusas & M. McEachern. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2-3): 251-268 pp.
- Preston, E. M. & J. L. Preston. 1974. Ecological structure in a west indian gorgonian fauna. *Bull. Mar. Sci.* 25:248-258
- Ramírez, C.H. 2012. Aplicación del modelo SWAT para el análisis del flujo base en una cuenca mexicana del Pacífico Sur. Tesis de maestría, Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas Montecillo, Texcoco, México

- Restrepo, J.C. & J. D. Restrepo. 2005. Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la cuenca de río Magdalena. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 29 (111):239-254.
- Rial, M. E., C. Varela., M. A. Álvarez & F. Díaz-Fierros. 2003. Aporte de sedimentos de una cuenca y relación de descarga en un río de la zona húmeda española. *Edafología* 10 (2): 127-133.
- Riegl, B & G.M. Branch. 1995. Effects of sediment on the energy budgets of four scleractinian (Bourne 1900) and five alcyonacean (Lamouroux 1816) corals. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 186: 259-275.
- Roberts, H.H., & J.N. Suhayda. 1983. Wave-current interactions on a shallow reef (Nicaragua, Central America), *Coral Reefs* 1:209-214.
- Rodríguez, T. D. 2012. Disponibilidad del agua y riesgo hidrológico en los escurrimientos de la cuenca del río Copalita, con un modelo estocástico. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, México.
- Rogers, C.S. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 62: 185-202.
- Roldán, I.E & Y. Sevilla Salcedo. 2014. Cambios de uso del suelo y vegetación (1970-2005) en la cuenca del Río Eslava, Distrito Federal, México. *Rev. Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente.* Vol. 1. Núm. 5. pp. 1-10.
- Romero-Gil, I. 2003. Comportamiento de nutrientes en la pluma del Río Ebro. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. 622 pp.
- Rose, C.W. 1985. Develops in soil erosion and deposition models, *Advances in Soil Science.* Vol. 2. Springer-Verlag.
- Rosete-Vergés, F. A., J. L. Pérez-Damián, M. Villalobos-Delgado., E.N. Navarro-Salas., E. Salinas-Chávez & R. RemondNoa. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20 (1), 21-35.
- Rowan, R. 2004. Coral bleaching: thermal adaptation in reef coral symbionts. *Nature*, 430(7001): 742.
- Rudel, T., O. T. Coomes, E. Moran, F. Achard, A. Angelsen, J. Xu & E. Lambin. 2005. Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change* 15: 23-31.

- SAGARPA. 2014. Diagnóstico socioeconómico integrado de la Subcuenca del Río Copalita. Oaxaca, México. pp. 145
- Sanz, M. E. 2002. Aporte de sedimentos a embalses y tasas de erosión en distintos sectores de la cuenca del Ebro. *GEOGACETA* 32: 223-226.
- SEMAVI, 2009. Programa de Ordenamiento Ecológico de la Cuenca Río Sabinal. Secretaria de Medio Ambiente y Vivienda. Chiapas, México.
<http://www.bitacora.semahn.chiapas.gob.mx/oet/Oet2>. Fecha de consulta 19 de septiembre de 2018.
- Shiah, F. K., S.J. Kao., G.C. Gong & K.K. Liu. 1996. Spatial variability of phytoplankton production and the implications of its controlling mechanisms in the coastal zone near the river mouth of the Lanyang His. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 37:9-15 pp.
- Silva, R., M. Martínez, P. Moreno, E. Mendoza, J. López-Portillo, D. Lithgow, G. Vázquez, R. Martínez & R. Ibarra. 2018. Aspectos generales de la zona costera. UNAM; INECOL. 54 pp.
- Stafford-Smith, M.G & R.F.G. Ormond. 1992. Sediment-rejection mechanism of 42 species of Australian scleractinian corals. *Marine and Freshwater Research* 43:683-705
- Stafford-Smith, M.G & R.F. G. Ormond. 1993. Sediment-rejection efficiency of 22 species of Australian scleractinian corals. *Marine Biology* 115:229-243
- Tapia, M. E & C. Naranjo. 2003. Diversidad del plancton en el estuario interior de Puerto Bolivar, Ecuador durante julio de 2002. *Acta Oceanográfica del Pacífico*. 12(1): 29-49.
- Tapia-Bernitta. 2010. Variabilidad estacional del fitoplancton y su relación con los parámetros ambientales en Esmeraldas durante 2004-2005. Tesis de Maestría en Manejo Sustentable de Recursos Bioacuáticos y Medio Ambiente. Universidad de Guayaquil. 168 pp.
- Toller, W.W, R. Rowan & N. Knowlton, 2001. Zooxanthellae of the *Montastraea annularis* species complex: patterns of distribution of four taxa of Symbiodinium on different reefs and across depths. *Biology Bulletin*, 201: 348-359.
- Torres, Colín, R. 2004. Tipos de vegetación. En: García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J. & M. Briones-Salas. (Eds), Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-WorldWildlifeFund, México, pp. 104-117

- True, J. D. 2012. Salinity as a structuring force for near shore coral communities. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia.
- Umaña, G. E. 2002. Manejo de Cuencas Hidrográficas y Protección de Fuentes de Agua. Taller de Capacitación. Universidad Nacional Agraria. Republica de Nicaragua
- Valérie, D., B. Sautour., P. Chardy & M. Leconte. 2005. Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: The Gironde estuary (France). *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 64:171-184.
- Vásquez, T.D. 2012. Transporte de sedimento como carga de fondo en la cuenca del río Narcea (vertiente Norte de la Cordillera Cantábrica). Universidad de Oviedo. Tesis doctoral
- Vásquez-Domínguez, E. 2003. Diversidad y distribución de crustáceos y equinodermos y su relación con niveles de sedimentación en arrecifes coralinos. *Rev. Biol. Trop.* 51: 183-194.
- Velázquez, A., J.F. Mas., R. Díaz-Gallegos. P. Mayorga-Saucedo., P. C. Alcántara., T. Fernández., G. Bocco. E. Ezcurra & J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Rev. Gaceta Ecológica. SEMARNAT* 62:21-37
- Villareal-Hernández, D.R. 2011. Evaluación del escurrimiento a través del análisis del cambio de uso de suelo, utilizando SIG. Tesis de Maestría Ciencias de la Conservación y Recursos Naturales. CIIDR. Oaxaca. pp. 15
- Walther-Mendoza, M., H. Reyes-Bonilla., T.C. LaJeunesse & R.A. López-Pérez. 2016. Distribución y diversidad de dinoflagelados simbióticos en corales pétreos de la costa de Oaxaca, Pacífico de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 87(2): 417-426.
- Wittenberg, M & W. Hunte. 1992. Effects of eutrophication and sedimentation on juvenile corals. Abundance, mortality and community structure. *Mar. Biol.* 112: 131-138.
- Woolhiser, D.A., R.E. Smith & D.C. Goodrich. 1990. KINEROS, a kinematic runoff and erosion model. USDA-ARS-77.

12. Anexos

Anexo I. Leyenda jerárquica utilizada en la evaluación del cambio de uso del suelo

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas	
I Cultivos	1 Agricultura (riego y humedad)	Agricultura de riego (incluye riego eventual) Agricultura de humedad Riego suspendido Pastizal cultivado	
	2 Agricultura (de temporal)	Agricultura de temporal ¹	
	3 Plantación forestal	Plantación forestal	
II Bosques	4 Coníferas	Bosque de tascate ^{2,3} Bosque de oyamel (incluye ayarin y cedro) ^{2,3} Bosque de pino ^{2,3} Matorral de coníferas ^{2,3}	
	5 Coníferas-latifoliadas	Bosque bajo-abierto ^{2,3} Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) ^{2,3}	
	6 Latifoliadas	Bosque de encino ^{2,3}	
	7 Mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña ^{2,3}	
	III Selvas	8 Perennifolia y subperennifolia	Selva alta y mediana perennifolia ^{2,3} Selva baja y perennifolia ^{2,3} Selva alta y mediana subperennifolia ^{2,3} Selva baja subperennifolia ^{2,3}
		9 Caducifolia y subcaducifolia	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia ^{2,3} Selva baja caducifolia y subcaducifolia ^{2,3} Matorral subtropical ^{2,3} Selva baja espinosa ^{2,3}
		IV Matorral	10 Mezquital
11 Matorral xerófilo			Matorral crasicale ^{4,5} Matorral sarcocrasicaule ^{4,5} Matorral sarcocaulé ^{4,5} Matorral sarcocrasicaule de neblina ^{4,5} Matorral desértico microgilo ^{4,5} Matorral desértico rosetofo ^{4,5} Matorral rosetofo costero ^{4,5} Vegetación de desiertos arenosos Matorral espinoso tamaulipeco ^{4,5} Matorral submontano ^{4,5} Chaparral ^{4,5}

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas
V Pastizal	12 Pastizal	Pradera de alta montaña
		Pastizal natural (incluye pastizal-huizachal)
		Pastizal inducido
		Sabana
VI Vegetación hidrófila	13 Vegetación hidrófila	Manglar
		Popal-tular
		Vegetación de galería (incluye bosque y selva)
VII Otros tipos de vegetación	14 Otros tipos de vegetación	Palmar
		Vegetación halófila y gipsófila
		Vegetación de dunas costeras
VIII Otras Coberturas	15 Área sin vegetación aparente	Área sin vegetación aparente
	16 Asentamiento humano	Asentamiento humano
	17 Cuerpo de agua	Cuerpo de agua

1 Incluye dos categorías: con cultivos anuales, o con cultivos permanentes y semipermanentes.

2 Incluye la vegetación primaria y la vegetación secundaria arbórea en una sola categoría.

3 Incluye a las comunidades con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

4 Se refiere a las comunidades de matorrales con vegetación primaria.

5 Incluye la vegetación secundaria derivada de la alteración de los matorrales.

Anexo II. Resultado del análisis de la varianza para determinar diferencias temporales y espaciales entre el índice de turbidez (IT) determinado en la pluma de sedimentos de la desembocadura del río Copalita y los arrecifes de coral localizados en Isla Montosa y bahía La Entrega (Huatulco, México) en el año 2017

Variable	Grados de libertad	F	p
Intercepto	1	32.10018	0.000004
Localidad	2	5.00998	0.013264
Temporada	1	2.70068	0.110747
Localidad*temporada	2	1.25677	0.299127

Anexo III. Resultado del análisis de la varianza para determinar diferencias temporales y espaciales entre la tasa de sedimentación de los arrecifes de coral localizados en Isla Montosa y bahía La Entrega (Huatulco, México) en el año 2017

Variable	Grados de libertad	F	p
Intercepto	1	169.3614	0.000000
Temporada	1	25.1998	0.000003
Localidad	1	68.2203	0.000000
Temporada*localidad	1	20.3498	0.000023

Anexo IV. Coeficiente de correlación con matriz de Pearson, entre registros de turbidez y tasa de sedimentación de Isla Montosa y bahía La Entrega (Huatulco, México) en el año 2017

	IT IM	IT ENT	TS IM	TS ENT
IT IM	1.00	0.93	-0.57	-0.49
IT ENT		1.00	-0.69	-0.54
TS IM			1.00	0.75
TS ENT				1.00

IT= Índice de turbidez; TS= Tasa de sedimentación; IM=Isla Montosa y ENT= bahía La Entrega