



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS
POSGRADO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS



**DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS
ESCURRIMIENTOS Y LA EROSIÓN HÍDRICA EN UNA
CUENCA DEL NORTE DE MEXICO**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y
MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA

Isaac Gramillo Avila

Director: Dr. Ricardo Trejo Calzada

Co-director: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Bermejillo, Durango, México

Junio 2021



La presente tesis de maestría titulada **Dinámica de la vegetación y su relación con los escurrimientos y la erosión hídrica en una cuenca del Norte de México** fue realizada por **Isaac Gramillo Avila** bajo la dirección del Dr. Ricardo Trejo Calzada y la co-dirección del Dr. Ignacio Sánchez Cohen, ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
DE ZONAS ÁRIDAS

Director

Dr. Ricardo Trejo Calzada

Co-director

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Asesor

Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle

Asesor

Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

RECONOCIMIENTOS

Se expresa un reconocimiento al apoyo y sustento otorgado para el desarrollo y término de la presente investigación y de mis estudios de posgrado:

Al ***Programa de Becas Nacionales de CONACyT 2019-2020.***

Al ***Programa de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas 2019-2020***, de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

AGRADECIMIENTOS

A mis Codirectores de Tesis, Dr. Ricardo Trejo Calzada, Dr. Ignacio Sánchez Cohen, Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle y el Dr. Aurelio Pedroza Sandoval, por su orientación, confianza y apoyo para poder concluir este trabajo. Agradezco profundamente el tiempo que dedicaron en mi investigación.

A mis compañeros, familiares y amigos; Raymundo Trujillo Domínguez, José Manuel García Vargas, Melanie Valencia Muñoz y Lucia Álvarez Guerrero, Alejandro Cruz González, a las personas de la comunidad San Luis del Cordero quienes abrieron las puertas de sus hogares y nos brindaron su hospitalidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca con número 958730 para la realización de estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por ser el órgano director del posgrado, por brindarme el apoyo y respaldo incondicional durante mi formación como Maestro en Ciencias.

A la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, en la cual me he formado profesionalmente, por ofrecerme todas las facilidades para poder estudiar su programa de posgrado y a los profesores de esta institución que dedicaron su tiempo en transmitir su conocimiento.

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por permitirme ser quien soy y por todas las cosas buenas que me ha otorgado.

A mi madre **María Joaquina Avila Devora** por darme la vida y estar siempre a mi lado, la que siempre me cuida y me da confianza para seguir siempre adelante, quien me da la mano cuando me tropiezo y así seguir adelante.

A mi hermana **Selma** por el apoyo incondicional y por aguantarme en todo momento.

A mis hermanos **Reina Abilene** y **Gustavo** por ser tan buenos y siempre estar al pendiente, así como apoyarme en todo momento y ser un motivo más para seguir adelante.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Isaac Gramillo Avila

Fecha de nacimiento: 14 de abril de 1995

Lugar de nacimiento: Guadalupe Victoria, Durango

Numero de cartilla militar: D-5040121

CURP: GAAI950414HDGRVS03

Grado: Ingeniero en Sistemas Agroalimentarios

Cédula profesional: 12285840



Estudios académicos

Preparatoria: Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos, número 12 Ramón Corona (2010-2013).

Licenciatura: Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo, Mapimí, Dgo. (2014-2018).

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN GENERAL.....	1
GENERAL ABSTRACT.....	2
CAPITULO I.....	3
1.1. INTRODUCCION GENERAL	3
1.3. HIPOTESIS	6
CAPITULO II.....	7
2.1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
Vegetación de zonas áridas.....	7
Métodos de estudio de la vegetación	9
Percepción remota.....	10
Escurrimientos superficiales	13
Erosión.....	17
2.2. LITERATURA CITADA.....	20
CAPITULO III.....	25
DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS ESCURRIMIENTOS Y LA EROSIÓN HÍDRICA EN UNA CUENCA DEL NORTE ÁRIDO DE MÉXICO	25
RESUMEN.....	25

ABSTRACT.....	26
3.1. INTRODUCCIÓN	27
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	30
Ubicación geográfica del área de estudio.....	30
Muestreo de vegetación	30
Levantamiento fisiográfico remoto con uso de dron	31
Obtención de información satelital.....	31
Análisis de imágenes tomadas con el dron.....	32
Registro de precipitación	32
Estimación de escurrimientos (Q).....	33
Estimación de la erosión hídrica (WE).....	34
3.3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	36
Análisis de la vegetación mediante uso de dron.....	42
3.4. CONCLUSIÓN	55
3.5. LITERATURA CITADA.....	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Números de las curvas (CN) de escorrentía para complejos hidrológicos uso agronómico - tipo de suelo para condiciones de humedad II.	15
Cuadro 2. Superficie con cobertura vegetal en el área de la microcuenca de San Luis del Cordero, Durango.	37
Cuadro 3. Variación temporal de la vegetación en términos de cobertura vegetal en el suelo en la subcuenca media San Luis del Cordero, Durango.	38
Cuadro 4. Cobertura vegetal promedio en tres estratos de la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.	39
Cuadro 5. Superficie con vegetación (m ²) correspondiente al piso forestal en tres estratos de la microcuenca San Luis del Cordero, Durango en tres fechas.	40
Cuadro 6. Comparaciones para superficie con cobertura vegetal correspondiente al área basal o piso forestal en diferente condición espacio temporal dentro de la subcuenca San Luis del Cordero, Durango.	41
Cuadro 7. Comparaciones para cobertura vegetal basal o piso forestal con respecto a los niveles de altura, en la subcuenca media Nazas-Aguanaval, San Luis del Cordero, Durango.	41
Cuadro 8. Datos del ortomosaico de abril de 2019.	43
Cuadro 9. Datos del ortomosaico de noviembre de 2019.	44
Cuadro 10. Índice de valor de importancia por especie (variación espacio - temporal).	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferencias entre Fotogrametría (izquierda) y LiDAR (Derecha), Scandinavian Drone AB (2021).....	11
Figura 2. Comportamiento de la precipitación media mensual en la cuenca San Luis del Cordero, Durango (1980 - 2018) datos observados por la comisión nacional del agua, 2020; Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, 2020.....	36
Figura 3. Ortomosaico de la cuenca San Luis del Cordero, Durango, correspondiente al mes de abril de 2019	43
Figura 4. Ortomosaico de la cuenca San Luis del Cordero, Durango, correspondiente al mes de noviembre de 2019.	44
Figura 5. Relación de la precipitación con los escurrimientos dentro de la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.	45
Figura 6. Relación cobertura de vegetación (NDVI) – Escurrimientos (Q) en la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.	46
Figura 7. Relación precipitación – índice de vegetación (NDVI) en la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.....	47
Figura 8. Relación de la cobertura vegetal con respecto a la precipitación en la cuenca de San Luis del Cordero, Dgo durante 2019.	48
Figura 9. Relación entre el NDVI y la erosión hídrica (WE) en la cuenca San Luis del Cordero, Dgo.....	49

RESUMEN GENERAL

Dinámica de la vegetación y su relación con los escurrimientos y la erosión hídrica en una cuenca del norte árido de México

Las relaciones entre vegetación y erosión han sido ampliamente investigadas. Sin embargo, su estudio en cuencas de zonas áridas es aún insuficiente. Este trabajo busca contribuir al conocimiento sobre el comportamiento fisiográfico con relación a los eventos hidrológicos dentro de la subcuenca, en la que se han registrado los eventos pluviales (pp), escurrimientos (Q), la erosión hídrica (WE), la dinámica de la cobertura vegetal y su comportamiento espacio-temporal. La subcuenca de estudio está ubicada al noreste de la localidad San Luis del cordero, Durango, presenta características de importancia productiva, social y ecológica. Los métodos que se utilizaron para medir la biomasa vegetal fueron mediante un muestreo simple aleatorio estratificado, por cuadrantes de 10 m por lado, se utilizó el levantamiento de fotografías aéreas mediante el uso de un dron, para la generación de un ortomosaico y se utilizaron fotografías satelitales que contenían los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la precipitación fue obtenida mediante pluviógrafos de cubeta ubicados dentro de la cuenca y datos históricos de la red de estaciones de CONAGUA. Los escurrimientos se calcularon mediante el método de curva numérica (CN) propuesta por el USDA en 1972 y la erosión hídrica se calculó “*in situ*” utilizando frascos de plástico para coleccionar sedimentos. Se encontró que existe una estabilidad estadística en la dinámica vegetal en la variación espacio temporal, el NDVI se relaciona de manera directamente proporcional con la precipitación en la cuenca. Además, se obtuvo de la correlación de NDVI – Q que a mayor índice de vegetación mayores escurrimientos y en la relación NDVI – WE se obtuvo una relación negativa proporcional y, por lo tanto, a mayores valores de NDVI la WE fue menor.

Palabras clave: microcuenca, precipitación, cobertura vegetal, escurrimientos, erosión hídrica.

GENERAL ABSTRACT

Vegetation dynamics and its relationship with runoff and water erosion in a watershed in arid northern Mexico

The relationships between vegetation cover and erosion have been widely studied. However, research for arid regions is not yet enough. This work seeks to contribute to the knowledge about the physiographic behavior in relation to hydrological events within the watershed, in which rainfall events (pp), runoff (Q), water erosion (WE) and the dynamics of the vegetation cover and its spatial-temporal behavior. The study watershed located northeast of the San Luis del Cordero town, Durango, presents characteristics of productive, social and ecological importance. The methods used to measure the plant biomass were by means of a simple random stratified sampling, by quadrants of 10 m per side, the lifting of aerial photographs was used through the use of a drone, for the generation of an orthomosaic. Also, satellite images and data for the values of the normalized difference vegetation index (NDVI) were used. Precipitation was obtained using bucket rains located within the basin and historical precipitation was obtained from a meteorological stations net, runoff was calculated using the numerical curve (CN) method proposed by the USDA in 1972 and water erosion was calculated "in situ" using plastic jars to collect sediments. The results show that there is a statistical stability in vegetation cover along the space-time variation. The NDVI is directly proportional to the precipitation in the watershed. Moreover, from the correlation NDVI - Q it was obtained that as the index of vegetation increases the runoffs also increase. The water erosion has a negative correlation with the NDVI. The greater the NDVI the lower the WE.

Key words: watershed, precipitation, vegetation cover, runoff, water erosion.

Master of Science Thesis in Natural Resources and Environment in Arid Zones
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Gramillo Avila Isaac
Advisors: Ph. D. Ricardo Trejo Calzada & Ph. D. Ignacio Sánchez Cohen

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCION GENERAL

Una cuenca es una superficie territorial delimitada por un parteaguas y que puede ser la base para la planeación del uso y aprovechamiento de recursos naturales, principalmente agua, suelo y vegetación. Una cuenca hidrográfica se refiere a una región físicamente delimitada y caracterizada por que la precipitación pluvial escurre hacia un cauce común que desemboca en un punto de salida. Las cuencas hidrográficas están integradas por subunidades jerárquicas y se pueden subdividir en subcuencas y microcuencas. Estas también están delimitadas por un parteaguas y concentran los escurrimientos en una corriente común. Con base en el área que cubren, las cuencas pueden ser divididas en a) cuencas, cuando abracan una superficie mayor a 50 mil hectáreas, b) subcuencas aquellas cuya superficie es de 5 000 a 50 mil hectáreas y c) microcuencas aquellas con menos de 5000 hectáreas (Sánchez Vélez *et al.*, 2003; SEMARNAT, 2013).

En México las cuencas se encuentran agrupadas en 37 regiones hidrológicas para la realización de estudios hidrológicos y de calidad del agua, aunque a nivel nacional la gestión del agua se encuentra dividida en 13 regiones hidrológico - administrativas definidas por la Comisión nacional del agua (Comisión nacional del agua, 2006). En un estudio llevado a cabo por Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Instituto Nacional de Ecología (ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua) se distinguieron 1,471 cuencas hidrográficas, de las cuales 1,389 son exorreicas, 77 endorreicas y 5 arreicas. Alrededor del 55% de estas

cuencas tienen una superficie menor a 50 km² y solo un poco más del 1% cubren áreas mayores a 20,000 km² (SEMARNAT, 2013).

La cuenca es la unidad mínima de manejo del agua y otros recursos naturales. Además, es un área de interacción ecológica, social y productiva. En esta interacción la vegetación juega un rol preponderante ya que contribuye a mantener la calidad del agua, regular la cantidad y periodicidad de los cauces, mantener la estabilidad ambiental en la cuenca, infiltrar agua para recargar los acuíferos, proteger al suelo, capturar CO₂, controlar las inundaciones y ser resguardo y proveedor de recursos para la fauna, (Cuevas *et al.*, 2009; Comisión Nacional del agua, 2006). Es por ello que el reconocimiento de los aspectos hidrológicos como la precipitación (pp), los escurrimientos (Q) y su interacción con los cambios en la vegetación representan una parte esencial para su estudio (Gaspari, 2002).

En el estudio de las relaciones bióticas y abióticas, entre los procesos hidrológicos y los cambios en la dinámica de vegetación presente en cada cuenca, los factores como los escurrimientos, los cambios en la dinámica de vegetación y la erosión hídrica están estrechamente relacionados entre sí y, dependen de la precipitación ocurrida en el área (Duval *et al.*, 2015). Estudios recientes plantean que la gestión y aprovechamiento de los recursos naturales y particularmente del recurso agua a nivel de microcuenca ofrece mejores oportunidades de resiliencia para los sistemas agrícolas y pecuarios de pequeña escala y favorece intercambios de agua entre diferentes actividades (producción

agrícola, pecuaria, servicios ambientales, uso doméstico) (Rockstrom *et al.*, 2010).

El propósito de este estudio es describir y analizar el patrón actual de distribución de la vegetación con respecto al tiempo, así como su grado de interacción en una microcuenca a partir de la superficie territorial que ha sido modificada por actividad productiva. La importancia de este tipo de análisis está centrada en los escasos estudios de manejo y metodológicos a nivel escalar en los que se evalúa la dinámica temporal de la condición vegetal y su relación con los escurrimientos y la erosión hídrica a nivel de sub cuenca hidrológica.

1.2. OBJETIVO

Determinar la dinámica de la vegetación nativa como cubierta vegetal del suelo, en función de la precipitación pluvial y su impacto en la erosión hídrica por efecto de escorrentía en una microcuenca de San Luis del Cordero, Durango.

1.3. HIPOTESIS

Los eventos de escorrentía y erosión hídrica de la microcuenca de San Luis del Cordero, Durango, son independientes de la dinámica de la cobertura vegetal.

CAPITULO II

2.1. REVISIÓN DE LITERATURA

Una cuenca hidrológica es la unidad básica de manejo del agua, a partir de la cual es posible lograr un manejo integral de los recursos naturales asociados, en este nivel de manejo es posible la coordinación, concentración, consulta, apoyo y asesoría por parte de las dependencias federales a las cuales compete, las regiones hidrológico- administrativas están constituidas por al menos una cuenca para garantizar que sea esta quien sea responsable de la administración del agua (Comisión nacional del agua, 2006).

Vegetación de zonas áridas

Las plantas adoptan diversas formas o clases para adaptarse a su hábitat y se manifiestan en su crecimiento y desarrollo. Así podemos encontrar diferencias en altura, consistencia, forma del tallo, forma de las hojas permanencia del follaje entre otras (González, 2012).

También se pueden agrupar las plantas de acuerdo a sus características de adaptación al ambiente en el que se desarrollan. Raunkiaer (1934) propuso un sistema de clasificación de vegetación fácil de emplear. La base de este sistema son los órganos de persistencia de las plantas y su relación con espacio en el que viven. Los órganos de persistencia abarcan las yemas que pueden estar presentes en ramas pequeñas con hojas, así como semillas y esporas.

Estos tejidos permiten la sobrevivencia de las plantas durante las estaciones desfavorables. Por ejemplo, los tejidos embrionarios o meristemáticos pueden permanecer latente durante las estaciones frías o secas y después reanudar su actividad en la estación favorable del año. El grupo de plantas con estas características se ha denominado Fanerofitas, que son plantas normalmente leñosas que pueden llegar a vivir más de 20 años, con yemas que se encuentran a más de 25 cm del suelo.

Las fanerófitas se han dividido en cinco grupos de acuerdo a su altura: las Nanofanerófitas (0.25 a 2 m), Microfanerófitas (2 a 8 m), Mesofanerófitas (8 a 30 m), Megafanerófitas, de más de 30 m de alto. Por otra parte, las Caméfitas son plantas con meristemas entre 0 y 25 cm arriba de la superficie del suelo. Estas yemas tendrán menor exposición a las bajas temperaturas o a los vientos secos, comparadas con las yemas de las fanerófitas. Las Hemicriptófitas son hierbas perennes, con tejidos de persistencia que están en la superficie del suelo y son protegidas por la hojarasca o los residuos de plantas.

Las Geófitas son hierbas perennes con tejidos subterráneos. Las Pterófitas plantas herbáceas de ciclo de vida corto, anuales o efímeras, que sobreviven a las estaciones desfavorables como semillas.

Métodos de estudio de la vegetación

La vegetación de un área puede ser evaluada por diferentes métodos desde transectos, transectos variables, cuadrantes, punto centro cuadrado, líneas de intersección, puntos de intersección, muestreos fitosociológicos, los cuales se deben conocer para su análisis y validación respecto al área y objeto de estudio,

Los estudios pueden ser de tipo descriptivo, comparativo, observacional y experimental. Los estudios descriptivos son generalmente exploratorios y no tienen una hipótesis *a priori* (Mostacedo y Fredericksen, 2000).

Uno de los muestreos más comunes en ecología es el método por cuadrantes en los que se lleva a cabo una homogenización de las especies existentes en la zona, existen cuadrantes de diferentes tamaños que pueden ser de 4 m² (2x2 m) o 16 m² (4x4 m). Para árboles (mayor a 10 cm DAP), los cuadrantes pueden ser de 25 m² (5x5) o 100 m² (10x10). El tamaño de los cuadrantes depende de la densidad de las plantas a medirse; para refinar el tamaño adecuado, es necesario realizar pre-muestreos (Mostacedo y Fredericksen, 2000; Cuevas *et al.*, 2009).

Percepción remota

La percepción remota se ha definido como el grupo de técnicas para obtener información sobre un objeto o área sin tener que establecer contacto físico con el objeto o área. Las distancias que separan al sensor del objeto o área estudiados pueden estar en el rango de varios metros hasta miles de kilómetros (Villegas-Vega, 2008).

Fotogrametría

La fotogrametría es un proceso de medición de características de la superficie a partir de imágenes. A partir de imágenes de un espacio se desarrollan modelos precisos del mismo. El objetivo fundamental es digitalizar la realidad para la topografía y la cartografía. Los primeros estudios fotogramétricos se basaban en imágenes tomadas desde puntos elevados o desde globos aerostáticos. Actualmente, es más común el uso de drones para recoger datos topográficos y la captura de imágenes a nivel del suelo. La fotogrametría se utiliza en diversas actividades económicas, con una amplia gama de aplicaciones desde la cartografía forense, hasta su uso en la agricultura de precisión (PIX4D mapper, 2021).

Existen tecnologías más avanzadas que difieren y a su vez complementan a la fotogrametría, como lo es la tecnología LiDAR, la cual además tiene una gran ventaja sobre la fotogrametría, ya que esta produce su propia luz. Esta característica implica que las condiciones meteorológicas como la nubosidad, y los cambios en las condiciones de iluminación no afecten la obtención de datos. El escaneo laser aéreo y en el terrestre se benefician de esta tecnología, mientras

que la fotogrametría con drones o cámaras de mano se ven afectada por las condiciones adversas de iluminación.

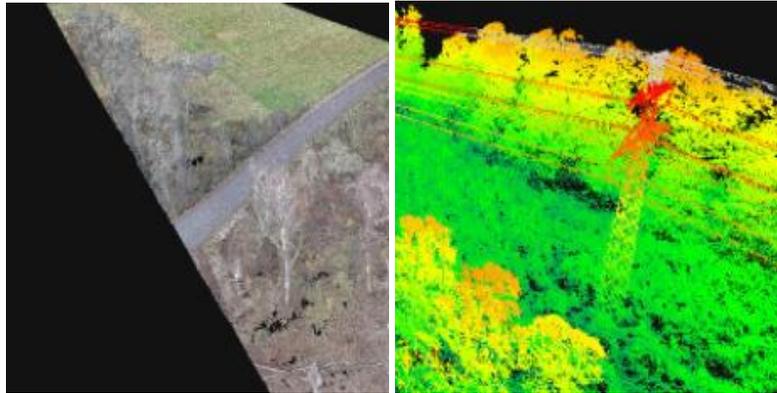


Figura 1. Diferencias entre Fotogrametría (izquierda) y LiDAR (Derecha), Scandinavian Drone AB (2021).

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El estudio sobre la variación espaciotemporal de la reflectancia, la radiación solar en las bandas del visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas relacionados con plagas o enfermedades (Aranque y Jiménez, 2009), tiene su función determinando la relación entre la magnitud de un indicador de varios ecosistemas forestales, es decir, la biomasa aérea (Meneses, 2011), en los usos agrícolas o relacionados con la variación espacial de la biomasa vegetal en un lapso de tiempo determinado, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el índice más conocido de esta naturaleza, de una amplia gama que varía en función de las características y objetivos para los que se requieran. La

principal ventaja de este índice es la sencillez de cálculo y que emplea un rango variación fijo (entre -1 y +1). Esto permite establecer umbrales y comparar imágenes. La interpretación del NDVI es relativamente sencilla, así del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas, valores de 0.2 a 0.3 pueden representar zonas con estacas, vegetación de arbustos o pasturas naturales (Muñoz, 2013).

El estudio sobre la variación espaciotemporal de la reluctancia, la radiación solar en las bandas del visible, infrarrojo y los índices de vegetación constituyen enfoques importantes para dar una mirada desde lo geográfico a los problemas relacionados con plagas o enfermedades (Aranque y Jiménez, 2009) en los usos agrícolas o relacionados con la variación espacial de la biomasa vegetal en un lapso de tiempo determinado, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el índice más conocido de esta naturaleza, de una amplia gama que varía en función de las características y objetivos para los que se requieran, La razón fundamental su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas, valores de 0.2 a 0.3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (Muñoz, 2013).

Escurrecimientos superficiales

Los escurrimientos superficiales de agua que ocurren dentro de una cuenca están estrechamente relacionados con la cantidad de lluvia que ahí ocurra por evento. Los escurrimientos dependen también de las condiciones de humedad del suelo, su capacidad de infiltración, la pendiente que predomine y la presencia o ausencia de cobertura vegetal (Velásquez *et al.*, 2007), la relación existente entre la precipitación pluvial y los escurrimientos son un parámetro básico en el estudio en la respuesta hidrológica de cualquier cuenca, en su dinámica se encuentra que los procesos de infiltración, almacenamiento y escurrimiento del agua en un punto territorial depende de las interacciones complejas entre su condición topográfica, la geología, vegetación, tipo de suelo, clima y la manipulación antropológica (Cervantes y Domínguez, 1988).

La modelación de la relación precipitación-escurrimiento ha sido desarrollada empleando esquemas simplificados. Un ejemplo de ello es el método, curva numérica (NC) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Sin embargo, las bases teóricas de este método han sido debatidas en los últimos tiempos. Por ello se ha desarrollado un método exponencial que puede ser reducido en función de un solo parámetro y conserva la simplicidad y facilidad de operación (López *et al.*, 2011).

Uno de los métodos para estimar los escurrimientos es el de curva numérica propuesto por el SCS (USDA - SCS, 1972), el método del número de curva utiliza distintos datos de entrada, como lo es la cantidad de lluvia, como escorrentía precipitada en la zona, asumiendo, que en una misma cuenca los diferentes valores de lluvias provocarán diferentes escorrentías.

El método de curva numérica para estimar los escurrimientos utiliza distintos datos de entrada como la precipitación pluvial y escorrentía en la zona. Asumiendo que en una misma cuenca los diferentes valores de lluvias provocarán diferentes escorrentías. Lo más conveniente para la estimación será tomar en cuenta la lluvia que genere un valor mayor de escorrentía. Por lo tanto, se deberá utilizar el tiempo de concentración como punto de entrada en las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) de la zona de estudio. Ibáñez *et al.*, (2010) presentan la siguiente expresión matemática:

$$Q = (I - 0.2*S)^2 / I + 0.8*S,$$

Donde;

Q: es la escorrentía dada en mm.

I: es la cantidad de lluvia en mm y,

S: es la diferencia máxima potencial entre la lluvia caída y la escorrentía generada, para obtenerla se sigue la expresión;

$$S = (25000 / CN) - 254$$

Siendo;

CN el valor de número de curva obtenido de tablas previamente establecida.

Cuadro 1. Números de las curvas (CN) de escorrentía para complejos hidrológicos uso agronómico - tipo de suelo para condiciones de humedad II.

Cubierta del suelo			Números de curva correspondientes a los grupos hidrológicos del suelo			
Clase	Laboreo	Condiciones hidrológicas para la infiltración	A	B	C	D
Barbecho cultivos alineados	-	-	77	86	91	94
	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C - T	Pobres	66	74	80	82
	C - T	Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C - T	Pobres	61	72	79	82
	C - T	Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Pobres	66	77	84	88
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
	C - T	Pobres	63	73	80	83
	C - T	Buenas	51	67	76	80

Fuente; Universidad Politécnica de Valencia; Ibáñez *et al.*, 2010.

Cubierta del suelo			Números de curva correspondientes a los grupos hidrológicos del suelo			
Clase	Laboreo	Condiciones hidrológicas para la infiltración	A	B	C	D
Prados permanentes montes con pastos (ganadero - forestal)	C - T	Buenas	51	67	76	80
	-	-	30	58	71	78
	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
Bosques (forestales)	-	Buenas	25	55	70	77
	-	Muy pobres	56	75	86	91
	-	Pobres	46	68	78	84
	-	Regulares	36	60	70	76
	-	Buenas	26	52	63	69
Caseríos	-	Muy buenas	15	44	54	61
	-	-	59	74	82	86
	-	-	72	82	87	89
Caminos de tierra	-	-	74	84	90	92
Caminos en firme	-	-				

Fuente; Universidad Politécnica de Valencia; Ibáñez *et al.*, 2010.

Erosión

Es la degradación del suelo que consiste en un proceso de desprendimiento, transporte y deposición de partículas del suelo que puede ser inducido por la acción climática o por el hombre, disminuye la capacidad en el presente o en el futuro para sostener la vida humana y se ve acelerada por efecto del sobrepastoreo, las malas prácticas agrícolas superficiales, las actividades industriales y por la lluvia (erosión hídrica) (Nearing *et al.*, 1994; Espinoza *et al.*, 2011).

La erosión hídrica

Es altamente frecuente en las cuencas, debido a las condiciones favorable para su desarrollo. Esas condiciones son la presencia de lluvias intensas y abundantes, suelos arenosos, topografía altamente irregular y, comúnmente, uso y manejo de suelo inapropiados. Por el contrario, la cubierta vegetal puede ser un factor fundamental en la protección del suelo contra la erosión. Ello incluye la acción protectora tanto la vegetación nativa como de los cultivos (Febles y Durán. 1988; Leal *et al.*, 2007).

La erosión hídrica puede ser calculada por distintos métodos. Por ejemplo, para estimación de erosión por efectos de cultivo se emplea el modelo RUSLE (Schiettecatte, 2005.). Este modelo se representa con la siguiente ecuación:

$$A= R \times K \times LS \times C \times P$$

donde:

A: Expresa la pérdida de suelo anual por unidad de área ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

R: Factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), refleja el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo y la erosividad del escurrimiento generado.

K: Factor de erodabilidad del suelo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$), basado en la composición textural, contenido de materia orgánica, permeabilidad y estructura del suelo. Incorpora la humedad y la consolidación del suelo.

LS: Refleja el efecto del relieve

L factor de longitud de pendiente

S factor de inclinación de la pendiente)

C: Factor de manejo del cultivo, refleja el uso anterior del suelo, los residuos y la rugosidad de la superficie, la cobertura del cultivo y la humedad del suelo

P: Toma en cuenta el efecto de las medidas de protección del suelo tales como la siembra en contorno y en franjas o barreras vivas (Cárdenas, 2006; Leal, *et al.*, 2007).

La erosión hídrica puede ser medida por métodos empíricos que recaban información “in situ” al momento de cada evento de lluvia, uno de ellos es utilizando los sedimentos que llegan hasta el punto más bajo de la cuenca, donde la pendiente y el terreno facilitan el flujo superficial, para ello intervienen diferentes factores de cálculo como lo son El factor C de manejo de cultivo y

cobertura del suelo, es la relación de pérdidas de un terreno cultivado en condiciones específicas y Factor P. Este factor indica la proporción del suelo perdido en las prácticas mecánicas de manejo del suelo específicas con relación a las pérdidas de suelo en cultivos a lo largo de la pendiente (Espinoza *et al.*, 2011).

Erosión potencial. La erosión hídrica potencial se estima de EUPS, al utilizar únicamente los factores RKLS (Wischmeier y Smith, 1978), expresada como $A = RKLS$. La razón es que los factores los factores cobertura del suelo (C) y prácticas de manejo (P) (CP) de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) representan las actividades atenuantes del proceso erosivo y en la medida que se diseñen prácticas agronómicas y mecánicas, la erosión potencial podrá reducirse a valores tolerables.

La erosión tolerable se refiere a la proporción máxima de pérdida de suelo que pueda ocurrir y aún permita que la productividad del cultivo sea económicamente sostenida (Flores *et al.*, 2003).

2.2. LITERATURA CITADA

- Aranque, L., y Jiménez, A. (2009). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. PALMAS Vol. 30 No. 3. Pp. 79.
- Cárdenas, S. (2006). Conferencia Magistral sobre degradación de los suelos, En: Congreso de suelos, Instituto de Suelo, La Habana
- Cervantes, L. y Domínguez, R. (1988). Relación lluvia escurrimientos en un sistema pequeño de cuencas de la selva baja caducifolia. Instituto de biología, UNAM, Instituto de ingeniería, UNAM. Ingeniería hidráulica en México. Pp. 42
- Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), (2006). El agua en México. México, www.cna.gob.mx. ISBN: 968-817-730-X
- Cuevas, M., Garrido, A., Pérez, J., y Iura, D. (2009). Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. Atlas de cuencas
- Espinosa, R., Andrade, L., Rivera, O., y Romero D. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. Papeles de Geografía, 53-54: 77-88.
- Esquivel, G., Bueno, P., Sánchez, I., Velázquez, M., y Muñoz, J. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del norte-centro de México. Agrofaz, 15 (2), 151-161.

- Febles, J. y Durán J. (1988). Manual de erosión y conservación de los suelos, Departamento de Ediciones del ISCAH, La Habana. Pp. 63.
- Flores, H., Martínez, E., Oropeza, M., Mota, J.; Mejía, E., y Carrillo, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 2. Pp. 233-244.
- González, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. Instituto Nacional de ecología, Pp. 105 – 108.
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gilbert, J. (2010). Valores de numero de curva: cálculo de escorrentía. Universidad Politécnica de valencia. Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Pp. 11.
- Leal, Z., Díaz, J., Schiettecatte, M., y Almoza, Y. (2007). Efecto de la cobertura vegetal de cultivos agrícolas principales sobre el proceso de erosión en suelos de la cuenca del río Cuyaguaje. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 16, No. 3. Pp. 76 – 83.
- López, E., Pellat, F., Martínez, M., Ríos, J., y Bolaños, M. (2011). Uso De Sensores Remotos En La Modelación Precipitación-Escurrimiento. Revista Terra Latinoamericana 29: 387-98.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321283007>.

- Meneses, C. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. FAO/C. PALMBERG-LERCHE, Unasyuva 238, Vol. 62. Pp. 39 – 46.
- Mostacedo, B., y Fredericksen, T. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Proyecto de manejo forestal sostenible (BOLFOS). Santa Cruz, Bolivia Pp. 92.
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales. Pp. 7 – 9.
- Osterkamp, W.R., Hupp, C.R., Stoffel, M. (2011). The interactions between vegetation and erosion: new directions for research at the interface of ecology and geomorphology. Earth Surface processes and Landforms 37(1):23-36
- Nearing, M., Lane, L., y López. V. (1994). Modeling soil erosion. Chapter 6. In: R. Lal (ed.). Soil Erosion Research Methods. 2nd Edition. S&WCS & St. Lucie Press. U. S. A. Pp. 127 – 156.
- PIX4D, (2021). LiDAR: Que es y que utilidad tiene para la fotogrametría. legal@pix4d.com
- Raunkiaer, C. (1934). The life forms of plants and statistical plant geography. Clarendon Press, Oxford. Pp. 632.
- Rockstrom, J., Alberg, L., Wani, S., Barron J., Hatibu, N., Owers, T., Bruggeman, A., Farahami, J., Quiang, Z., (2010). Managing water in rainfed agriculture.

The need for a paradigm Shift. *Agricultural Water Management* 97(2010):543-550

Sánchez Vélez, A.S., García Núñez, R.M., Palma Trujano, A. (2003). La cuenca hidrográfica. Unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Serie alternativas Productivas Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

SEMARNAT (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. México

Scandinavian Dron AB. (2021). Usos de la tecnología LiDAR. PIX4D® empresa legal@pix4d.com

Schiettecatte, W. (2005). Assessment of sediment and phosphorus transport from laboratory to watershed scale, Universidad de Gent,

United States Department Of Agriculture-Soil Conservation Service (USDA–SCS). (1972). National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology. USDA-SCS. Washington, D.C.

Velásquez, M., Esquivel, G., Sánchez, I., Castillo, D., Cano, A., y Gutiérrez, R. (2007). Comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca de uso silvopastoril en el sureste de Coahuila. *Revista mexicana de ciencias forestales*. Pp. 143 - 164.

Wischmeier, W. y Smith. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. US Department of Agriculture. Washington, DC.

Zhongming W., Lees B.G., Feng J., Wanning L., Haijing S. (2010) Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. *Catena* 83(2010):87-93

CAPITULO III

DINÁMICA DE LA VEGETACIÓN Y SU RELACIÓN CON LOS ESCURRIMIENTOS Y LA EROSIÓN HÍDRICA EN UNA CUENCA DEL NORTE ÁRIDO DE MÉXICO

Vegetation dynamics and its relationship with runoff and water erosion in a watershed in the arid north of Mexico

RESUMEN

Las relaciones entre vegetación y erosión han sido ampliamente investigadas. Sin embargo, su estudio cuencas de zonas áridas es aún insuficiente. Este trabajo busca contribuir al conocimiento sobre el comportamiento fisiográfico con relación a los eventos hidrológicos dentro de la subcuenca, en la que se han registrado los eventos pluviales (pp), escurrimientos (Q), la erosión hídrica (WE), la dinámica de la cobertura vegetal y su comportamiento espacio-temporal. La subcuenca de estudio está ubicada al noreste de la localidad San Luis del cordero, Durango, presenta características de importancia productiva, social y ecológica. Los métodos que se utilizaron para medir la biomasa vegetal fueron mediante un muestreo simple aleatorio estratificado, por cuadrantes de 10 m por lado, se utilizó el levantamiento de fotografías aéreas mediante el uso de un dron, para la generación de un ortomosaico y se utilizaron fotografías satelitales que contenían los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la precipitación fue obtenida mediante pluviógrafos de cubeta ubicados dentro de la cuenca y datos históricos de la red de estaciones de CONAGUA. Los escurrimientos se calcularon mediante el método de curva numérica (CN) propuesta por el USDA en 1972 y la erosión hídrica se calculó "*in situ*" utilizando frascos de plástico para coleccionar sedimentos. Se encontró que existe una estabilidad estadística en la dinámica vegetal en la variación espacio temporal, el NDVI se relaciona de manera directamente proporcional con la precipitación en la cuenca. Además, se obtuvo de la correlación de NDVI – Q que a mayor índice de vegetación mayores escurrimientos y en la relación NDVI – WE se obtuvo una relación negativa proporcional y, por lo tanto, a mayores valores de NDVI la WE fue menor.

Palabras clave: microcuenca, precipitación, cobertura vegetal, escurrimientos, erosión hídrica.

ABSTRACT

The relationships between vegetation cover and erosion have been widely studied. However, research for arid regions is not yet enough. This work seeks to contribute to the knowledge about the physiographic behavior in relation to hydrological events within the watershed, in which rainfall events (pp), runoff (Q), water erosion (WE) and the dynamics of the vegetation cover and its spatial-temporal behavior. The study watershed located northeast of the San Luis del Cordero town, Durango, presents characteristics of productive, social and ecological importance. The methods used to measure the plant biomass were by means of a simple random stratified sampling, by quadrants of 10 m per side, the lifting of aerial photographs was used through the use of a drone, for the generation of an orthomosaic. Also, satellite images and data for the values of the normalized difference vegetation index (NDVI) were used. Precipitation was obtained using bucket rains located within the basin and historical precipitation was obtained from a meteorological stations net, runoff was calculated using the numerical curve (CN) method proposed by the USDA in 1972 and water erosion was calculated "in situ" using plastic jars to collect sediments. The results show that there is a statistical stability in vegetation cover along the space-time variation. The NDVI is directly proportional to the precipitation in the watershed. Moreover, from the correlation NDVI - Q it was obtained that as the index of vegetation increases the runoffs also increase. The water erosion has a negative correlation with the NDVI. The greater the NDVI the lower the WE.

Key words: watershed, precipitation, plant biomass, runoff, water erosion.

3.1. INTRODUCCIÓN

México está constituido por 37 cuencas hidrográficas. Éstas se han agrupado en 13 regiones hidrológico - administrativas; las cuencas a su vez se dividen en subcuencas y microcuencas (Sánchez *et al.*, 2003). Así, se han llegado a identificar 1,471 cuencas, de las cuales 1,389 son exorreicas, 77 endorreicas y 5 arreicas. Alrededor del 55% de estas cuencas tienen una superficie menor a 50 km² y solo un poco más del 1% cubren áreas mayores a 20,000 km² (SEMARNAT, 2013).

Una cuenca es un sistema complejo por la gran variedad de componentes e interrelaciones que se establecen entre sus elementos. Además, es un sistema dinámico, interrelacionado, gobernado por procesos de retroalimentación, auto organizado, adaptativo y dependiente de su historia (Moreno y Renner, 2007). La adecuada planeación y gestión de la cuenca requiere la comprensión sistémica de las interacciones entre los diversos componentes biológicos y físicos del medio, así como los aspectos económicos, sociales y tecnológicos existentes (Cottler, 2007).

La vegetación es uno de los componentes del sistema de una cuenca. La vegetación establece interacciones complejas con el medio físico y otros componentes del medio biótico. Así, la vegetación existente en una cuenca es un factor determinante en los procesos naturales a través de varias funciones. Algunas de las funciones importantes que realiza la vegetación dentro de la cuenca son facilitar la infiltración de agua para recargar los acuíferos, proteger al

suelo de la erosión, capturar CO₂, coadyuvar a controlar las inundaciones y ser refugio y proveedor de recursos para la fauna, entre otras (Cuevas *et al.*, 2009).

La cubierta vegetal es uno de los parámetros frecuentemente utilizados en la evaluación de las relaciones entre vegetación y erosión del suelo. La vegetación y los procesos de erosión y deposición son interactivos. En general, la erosión del suelo disminuye al incrementar la cubierta vegetal. Esta relación ha sido la base de una gran cantidad de estudios sobre clasificación de la erosión del suelo y evaluación del riesgo de erosión del suelo (Osterkamp *et al.*, 2011; Zhongming *et al.*, 2010).

Los patrones de vegetación en las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por una distribución en manchones los cuales se pueden presentar en bandas o puntos. Las bandas pueden ser de 1 a menos de 100 m en tanto que los puntos pueden ser circulares o de formas irregulares (Aguilar y Sala, 1999). La distribución de la vegetación es afectada por la cantidad y distribución de la precipitación (Dekker *et al.*, 2007). Además de la cubierta vegetal y la superficie que cubre, la estructura de la vegetación juega un papel fundamental en la erosión. Una estructura con más estratos será más efectiva para reducir la energía de las gotas de lluvia que una estructura simple y por lo tanto coadyuvará a reducir la erosión (Zhao *et al.*, 2001). Por otra parte, La humedad del suelo superficial es afectada por las tasas de infiltración y modulada por la vegetación. Aunque los manchones o parches de vegetación pueden tener altas tasas de infiltración, la tasa efectiva de infiltración puede ser menor que la tasa potencial (Thompson *et al.*, 2018).

Aunque hay diversos estudios sobre vegetación y erosión, las relaciones espaciales y temporales de la precipitación con la vegetación, los escurrimientos y la erosión en cuencas de zonas áridas aún no son suficientes para la comprensión de las complejas interrelaciones que ocurren en el sistema y definir, en consecuencia, planes apropiados de gestión de los recursos naturales. El objetivo de este trabajo fue identificar los cambios de la cubierta y composición vegetal, su relación con la precipitación pluvial y su influencia en los escurrimientos y erosión del suelo en una microcuenca del norte de México.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica del área de estudio

La subcuenca experimental media del Nazas- Aguanaval se encuentra ubicada al noreste del municipio de San Luis del Cordero, Durango, entre los paralelos 25° 27' 13" latitud norte y 104° 17' 03" longitud oeste y 25° 24' 38" latitud norte y 104° 15' 12" longitud oeste, comprende un área de 1.58 km² con un perímetro de 611 km, la cuenca tiene una longitud máxima de 2.44 km (Esquivel *et al.*, 2015), con un tipo de suelo Acrisol predominante en la subcuenca, perteneciente a una textura arenosa (FAO, 2015). La micro cuenca de estudio se encuentra en el Municipio de San Luis del Cordero, en el Estado de Durango, México. Está ubicada al noreste de la cabecera municipal que lleva este mismo nombre, abarcando una superficie de 158 hectáreas y una longitud máxima de 2.44 km y un coeficiente de compacidad estimado de 1.36 (Esquivel *et al.*, 2015).

Muestreo de vegetación

En este estudio se empleó un sistema de muestreo simple aleatorio estratificado (MSAE) por cuadrantes (Mostacedo & Fredericksen 2000). Mediante inspección de campo, se definieron las áreas o estratos en los que se ubicarían los cuadrantes. Se establecieron tres estratos por altitud y en cada uno de ellos se muestrearon cuatro cuadrantes de 10 m x 10m. En cada uno de los cuadrantes se llevó a cabo un inventario de especies vegetales y se midieron los siguientes parámetros en cada espécimen: altura, largo y ancho de la parte superficial de la planta y, largo y ancho de la parte basal de la misma. Estos parámetros fueron empleados para determinar cobertura de la vegetación y el índice de valor de

importancia de cada especie. El muestreo se repitió tres veces en el tiempo, con dos muestreos en 2019 y uno en 2020.

Levantamiento fisiográfico remoto con uso de dron

Se realizaron dos vuelos con dron DJI Mavic 2 pro con una cámara L1 D 20 c RGB fabricada por Hasselblad®. La altura de los vuelos fue de 250 metros (escala 1:25000) de acuerdo a lo permitido por la orografía presente en la subcuenca, la cual tiene un rango de altitud entre 1,501 y 1,721 msnm. La operación del dron se realizó con la aplicación Drone Deploy ver 4.1.0. En los planes de vuelo se consideró un traslape horizontal de 60% frontal y 70% lateral.

Las imágenes obtenidas con el dron fueron empleadas para la generación de un ortomosaico. Se empleó una PC con 8 GB de RAM con procesador Intel Core i5, así como el programa PIX4D mapper (en período de prueba).

Obtención de información satelital

Mediante el uso de la plataforma Agro dashboard de la NASA se descargaron los datos cuantitativos precisos del polígono correspondiente a la microcuenca. Además, se obtuvieron imágenes satelitales (Landsat-8) del área de la microcuenca. Con ésta información se estimó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Análisis de imágenes tomadas con el dron

El proceso mediante el cual se trabajaron las imágenes digitales (ortomosaico) se llevó a cabo por método de separación de bandas RGB en el cual las imágenes fueron comparadas pixel a pixel para determinar la cobertura vegetal y suelo sin cobertura. Para determinar la cobertura vegetal el método de clasificación separación de bandas identifica la cantidad de pixeles que hay de cada característica (cobertura vegetal, superficie sombreada y suelo sin cobertura), de tal manera que conociendo el área total de la subcuenca será posible determinar el área que ocupa la cobertura vegetal. Este método puede ser fácilmente utilizado desde el software que contiene el paquete Qgis versión 3.18.2, gratuito para ordenadores Windows y Linux. A partir del análisis realizado por la calculadora de índices RGB para mapas tipo raster del software PIX4D mapper se calcularon las áreas correspondientes al suelo sin cobertura, área con vegetación y al área con efecto de sombra.

Registro de precipitación

El área de estudio cuenta con tres pluviógrafos tipo Tipping-Bucket, es decir, pluviógrafos de cubeta, los cuales son instrumentos que miden las precipitaciones mediante un mecanismo de cubos calibrados de idénticas proporciones que señalizan el volumen de precipitación obtenido mediante una acción de conmutación, la conmutación del mecanismo de cubeta vacía la lluvia colectada en uno de los cubos y coloca otro cubo listo para continuar el proceso de medición (León *et al.*, 2013). Los pluviógrafos se localizaron en las siguientes

coordenadas; 25° 26' 45.6" latitud norte y 104° 16' 14.6" longitud oeste a 1,577 msnm, correspondiente al pluviógrafo ubicado en el nivel más alto de la subcuenca de estudio; a los 25° 26' 19.5" latitud norte y 104° 15' 57.6" longitud oeste, a 1,531 msnm, el pluviógrafo que corresponde al nivel medio de altitud de la cuenca y, a los 25° 25' 54.7" latitud norte y 104° 15' 58.2" longitud oeste, a 1,503 msnm. Con esta base instrumental se tomaron los datos de precipitación mensual y la precipitación total anual, como base para conocer el comportamiento de las lluvias en el año.

Además del registro de la precipitación in situ, se obtuvieron los datos históricos de precipitación en el período 1980 – 2018 registrados por la red de estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua.

Estimación de escurrimientos (Q)

Con los datos de precipitación y el coeficiente de compacidad de la cuenca, se obtuvo el volumen de escurrimientos en la cuenca.

Los escurrimientos se calcularon de acuerdo a la ecuación empírica propuesta por las USDA (1972) y, usada por Sánchez *et al.*, 2003:

$$Q=(P-0.2 S)^2 / (P+0.8 S)$$

Donde

Q = representa los escurrimientos en mm

P = es la precipitación en mm

S = es el potencial de retención máxima en mm

Calculando S a partir de la siguiente ecuación:

$$S = 25.4 \times (1000 / CN) - 10$$

Donde

CN = es la curva numérica (parámetro adimensional), que para el presente estudio se utilizó el valor de 83 correspondiente a una cubierta de suelo de prados permanentes montes con pastos (ganadero, forestal) y una condición hidrológica pobre para la infiltración, como se indica en el cuadro publicado por la universidad politécnica de Valencia (USDA, SCS, 1972; Sánchez *et al.*, 2013; Ibáñez *et al.*, 2010).

La base de datos de precipitación de los pluviógrafos ubicados en la subcuenca se completó con información de la Comisión Nacional del Agua (Comisión nacional del agua, 2020).

Estimación de la erosión hídrica (WE)

Los datos correspondientes a la sedimentación para calcular la erosión hídrica fueron retomados de los datos observados en el 2018 ya que, fueron los eventos de los que se tiene un registro completo y los cuales fueron comparados posteriormente con sus respectivos eventos pluviales. El método que se utilizó fue empírico utilizando recipientes de plástico de 100 ml, obteniendo resultados en mm y tomas de muestra en lapsos de tiempo determinados y, muestras del flujo de escorrentía guiado hasta punto de aforo de la subcuenca.

Análisis vegetación, escurrimientos y erosión

Los datos obtenidos de vegetación fueron comparados con la precipitación ocurrida. Asimismo, la precipitación se comparó con los escurrimientos y la erosión hídrica por de regresión lineal, con el propósito de establecer un patrón de cambio e impacto.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2 se muestra el promedio histórico de la distribución temporal de la precipitación pluvial en el área de estudio. Como se observa en la Figura 2, en los meses junio, julio, agosto y septiembre ocurre la mayor precipitación. Este período coincide con la temporada de siembra de cultivos de temporal para las personas de la localidad cercana.

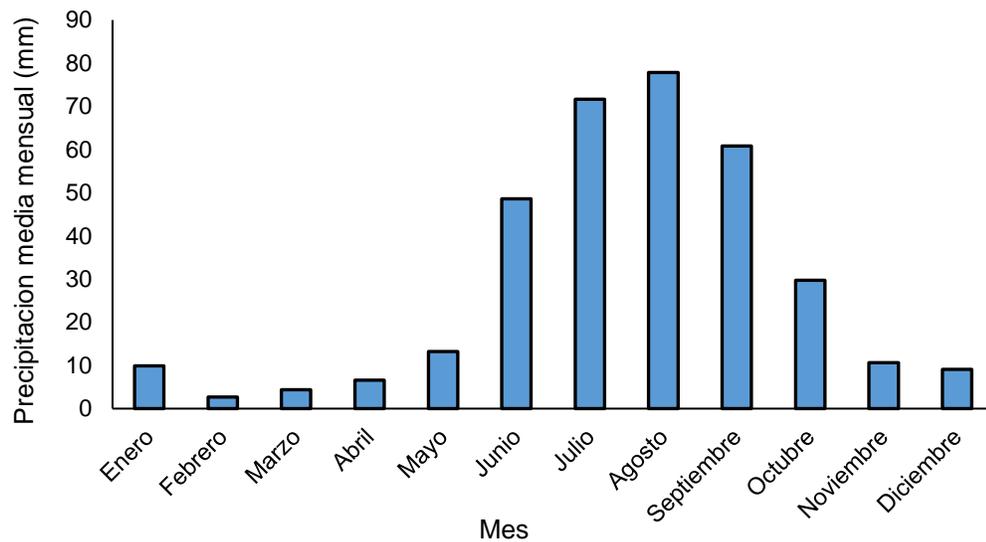


Figura 2. Comportamiento de la precipitación media mensual en la cuenca San Luis del Cordero, Durango (1980 - 2018) datos observados por la comisión nacional del agua, 2020; Secretaria del medio ambiente y recursos naturales, 2020.

No se encontraron diferencias estadísticas en la cobertura de vegetación de la microcuenca con respecto al tiempo, entre los tres muestreos realizados (Cuadro 2). Esto puede deberse a que en la temporada de lluvias aparecen efímeras con escasa cobertura. Se sabe que la vegetación adaptada a las zonas áridas

permanece prácticamente inalterada haya o no precipitación (Beltrán, 2012). Sin embargo, es notorio que la vegetación fue más abundante y tuvo una mayor cobertura en la parte baja de la cuenca existe una relación inversa entre altitud y vegetación. Así a mayor altitud menor vegetación y viceversa. Las partes bajas de las cuencas son en las que confluyen los escurrimientos de la parte alta y ello podría explicar una mayor profundidad del suelo, mayor humedad disponible y mayor vegetación.

Cuadro 2. Superficie con cobertura vegetal en el área de la microcuenca de san Luis del Cordero, Durango.

Nivel de altura	Área con vegetación (m ²)		
	Junio, 2019	Octubre, 2019	Enero, 2020
Alta	305.21	386.70	342.57
Media	439.42	444.48	457.31
Baja	592.84	574.64	609.48
Superficie de vegetación (m ²)	1337.47	1405.83	1409.36
Porcentaje de vegetación (%)	111.46	117.15	117.45
Error estándar (EE)	1.43	1.44	1.52

De acuerdo al cuadro 3, no existe una variación significativa ($P \leq 0.05$) de la cobertura vegetal promedio de la vegetación nativa en el área de estudio, durante el período de junio de 2019 a enero de 2020, lo cual significa que la densidad de vegetación se mantiene constante, independientemente de las estaciones del

año, ya que las tres fechas de muestreo efectuadas, correspondieron a finales de primavera y principios de verano, otoño e invierno. Lo anterior sugiere que dicha vegetación es de carácter perene y por tanto no existe efecto estacional. Lo anterior coincide con lo reportado por Malagnoux *et al.*, (2007) y Beltrán (2012), donde indican que las especies de las zonas áridas están bien adaptadas para tolerar inclemencias climáticas como las variaciones en la precipitación.

Cuadro 3. Variación temporal de la vegetación en términos de cobertura vegetal en el suelo en la subcuenca media San Luis del Cordero, Durango.

Tiempo	N	Valor medio de la cobertura vegetal por especie (m²)
Junio	244	4.71 a
Octubre	244	4.60 a
Enero	244	4.48 a

La información se agrupó utilizando el método LSD de Fisher y una confiabilidad del 95%, la literal a, al lado de cada valor de media corresponden a la agrupación designada.

De igual manera es posible observar en el cuadro 4, que la cobertura del suelo con vegetación nativa no varía de manera significativa ($P \leq 0.05$) en las diferentes alturas de la subcuenca media del Río Nazas-Aguanaval, lo cual sugiere que las especies vegetales ahí presentes, no son afectadas por la altura, al menos en los rangos que se evaluaron en este estudio. Posiblemente correspondan a especies

de mayor flexibilidad de adaptación por efecto de altitud orográfica. Lo anterior es congruente, con lo reportado por Belmonte y Romero (1998), donde se reporta que en áreas áridas y semiáridas se procedió a medir la relación existente entre la vegetación nativa de estas regiones con la preservación del recurso suelo y los factores hídricos, encontrando que pese a las condiciones desfavorables climáticas la vegetación adaptada se mantiene estable sin cambios estadísticos relevantes.

Cuadro 4. Cobertura vegetal promedio en tres estratos de la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.

Altura	N	Valor medio de la cobertura vegetal por especie (m²)
Parte alta	228	5.18 a
Parte baja	237	4.99 a
Parte media	267	3.62 a

La información se agrupó utilizando el método LSD de Fisher y una confiabilidad del 95%, la literal a, al lado de cada valor de media corresponden a la agrupación designada.

Los datos en la cobertura vegetal en el piso forestal no muestran variación con respecto al tiempo como se muestra en el Cuadro 5, además, de indicar un valor porcentual de cobertura basal congruente con lo reportado por Restrepo (1985), quien dice que, en condiciones de aridez en la región montañosa de la costa atlántica de Colombia, los cambios en la vegetación empiezan después de los 1,200 mm de precipitación a los 1,000 msnm. Granados *et al.*, (2013), menciona

que las especies de zonas áridas están fuertemente adaptadas a condiciones de sequías prolongadas y ocurren cambios en ellas, solo sí, son influenciados por las actividades productivas, resultando en una decreciente cobertura de biomasa vegetal. Si bien, en promedio no hubo diferencias de cobertura basal a través del tiempo (Cuadro 6), se puede observar que en la parte baja de la microcuenca la cobertura basal es significativamente mayor que en la parte alta de la cuenca (Cuadro 7).

Cuadro 5. Superficie con vegetación (m²) correspondiente al piso forestal en tres estratos de la microcuenca San Luis del Cordero, Durango en tres fechas.

Área muestreada (m ²)	Área con vegetación (m ²) cobertura basal		
	Junio, 2019	Octubre, 2019	Enero, 2020
Parte alta	46.84	44.27	42.11
Parte media	60.29	70.66	63.06
Parte baja	83.23	82.29	83.26
Superficie de vegetación (m ²)	190.37	197.24	188.43
Porcentaje de vegetación (%)	15.86	16.44	15.70
Error estándar (EE)	0.32	0.39	0.36

Cuadro 6. Comparaciones para superficie con cobertura vegetal correspondiente al área basal o piso forestal en diferente condición espacio temporal dentro de la subcuenca San Luis del Cordero, Durango.

Tiempo	N	Valor medio de la cobertura vegetal basal por especie (m²)
Junio	244	0.79 a
Octubre	244	0.82 a
Enero	244	0.78 a

La información se agrupó utilizando el método LSD de Fisher y una confiabilidad del 95%, la literal a, al lado de cada valor de media corresponden a la agrupación designada.

Cuadro 7. Comparaciones para cobertura vegetal basal o piso forestal con respecto a los niveles de altura, en la subcuenca media Nazas-Aguanaval, San Luis del Cordero, Durango.

Altura	N	Valor medio de la cobertura vegetal basal por especie (m²)
Parte baja	237	1.09 a
Parte media	267	0.74 ab
Parte alta	228	0.57 b

La información se agrupó utilizando el método LSD de Fisher y una confiabilidad del 95%, las literales a, ab y b al lado de cada valor de media corresponden a la agrupación designada.

Análisis de la vegetación mediante uso de dron

Con las imágenes tomadas con el dron, fue posible la creación de dos ortomosaicos en diferentes fechas del año 2019, que muestran un cambio en la biomasa, correspondiente a la estación seca en el mes de marzo y a la estación húmeda, después de la precipitación ocurrida para el mismo año. En las figuras 3 y 4 y en los Cuadros 8 y 9 se puede observar que después de las precipitaciones prácticamente es indetectable un cambio en la vegetación de la cuenca. Es probable que las precipitaciones del año 2019 fueron insuficientes para promover una mayor germinación y crecimiento de nuevas plantas, así como el crecimiento de las perennes.

Debido a que la calidad de la imagen no permitió construir el ortomosaico completo de la cuenca, el área original se redujo de 158.87 ha a 156.64 ha, esto significa que la franja sin información que se muestra en la figura 3 equivale a 2.22 ha. La superficie identificada como suelo sin cobertura es de 31.17 ha. El área con cobertura de vegetación es de 93.52 ha, correspondiente al 59.7 % de la superficie calculada de la sub cuenca y, el área que fue afectada por la sombra fue de 29.76 ha (Cuadro 8).

Después de la lluvia el 60.02 % del total de la superficie de la cuenca San Luis del Cordero está cubierta por vegetación, es decir 95.35 ha de las 158.8 ha que tiene la cuenca, además de la superficie que fue afectada por la sombra al momento de ser tomada la fotografía aérea (Cuadro 9).

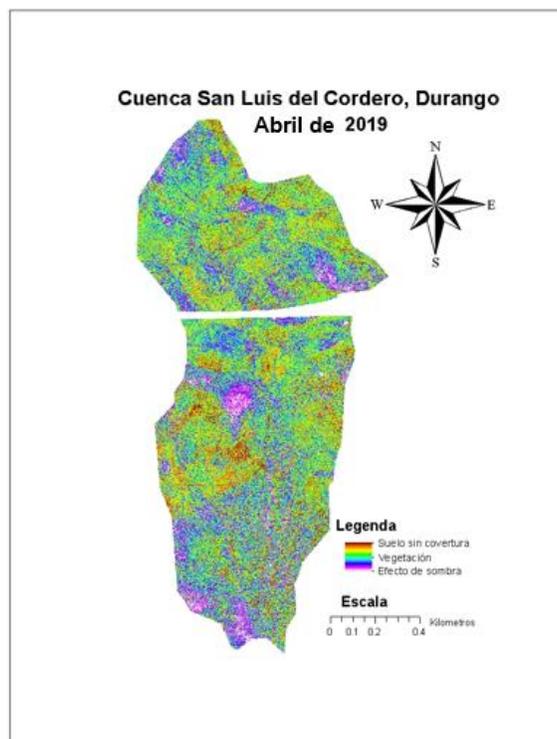


Figura 3. Ortomosaico de la cuenca San Luis del Cordero, Durango, correspondiente al mes de abril de 2019

Cuadro 8. Datos del ortomosaico de abril de 2019.

Color	Homologación	Mín	Max	Área (ha)	Área (%)
	Suelo sin cobertura	160.88	239.89	31.172	19.90
	Cobertura vegetal dispersa	136.73	160.88	31.204	19.92
	Cobertura vegetal media	114.81	136.73	31.188	19.91
	Cobertura vegetal densa	91.03	114.81	31.125	19.87
	Efecto de sombra	11.02	91.03	29.762	19.00

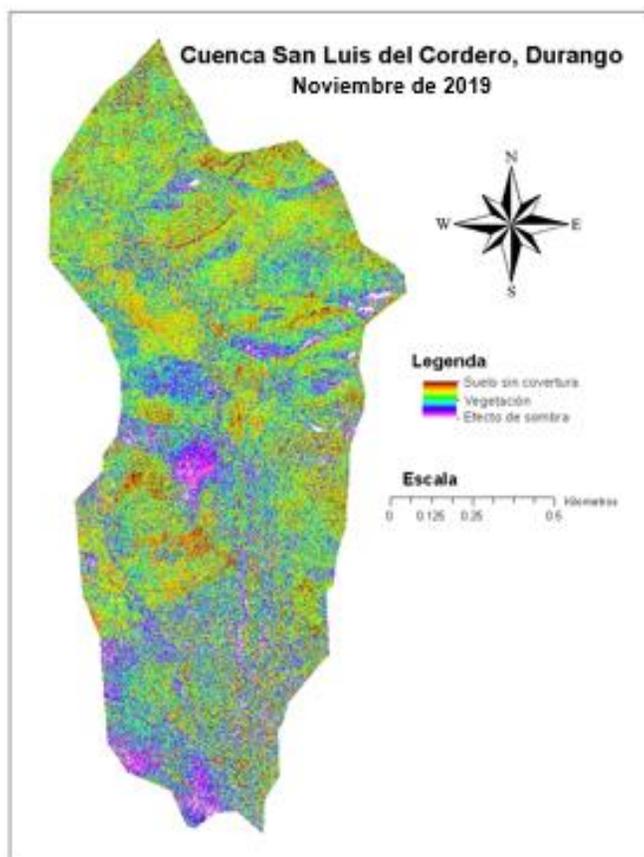


Figura 4. Ortomosaico de la cuenca San Luis del Cordero, Durango, correspondiente al mes de noviembre de 2019.

Cuadro 9. Datos del ortomosaico de noviembre de 2019.

Color	Homologación	Mín	Max	Área (ha)	Área (%)
	Suelo sin cobertura	160.88	239.89	31.7426	19.98
	Cobertura vegetal dispersa	136.73	160.88	31.7902	20.01
	Cobertura vegetal media	114.81	136.73	31.7902	20.01
	Cobertura vegetal densa	91.03	114.81	31.7744	20.00
	Efecto de sombra	11.02	91.03	31.7744	20.00

Con los datos de precipitación durante el año 2019, tomados de los pluviómetros dentro de la microcuenca se obtuvieron, las relaciones; precipitación pluvial (pp) - escurrimientos (Q), la relación de la erosión hídrica (WE) - dinámica de vegetación (NDVI) y la relación precipitación pluvial (pp) - dinámica de la vegetación (NDVI).

Los escurrimientos (Q) calculados dentro de la microcuenca siempre son menores o iguales a la precipitación (Sánchez *et al.*, 2003). Como se muestra Figura 5, los meses con mayores escurrimientos encontrados fueron mayo y julio, donde se tienen aumentos en la precipitación.

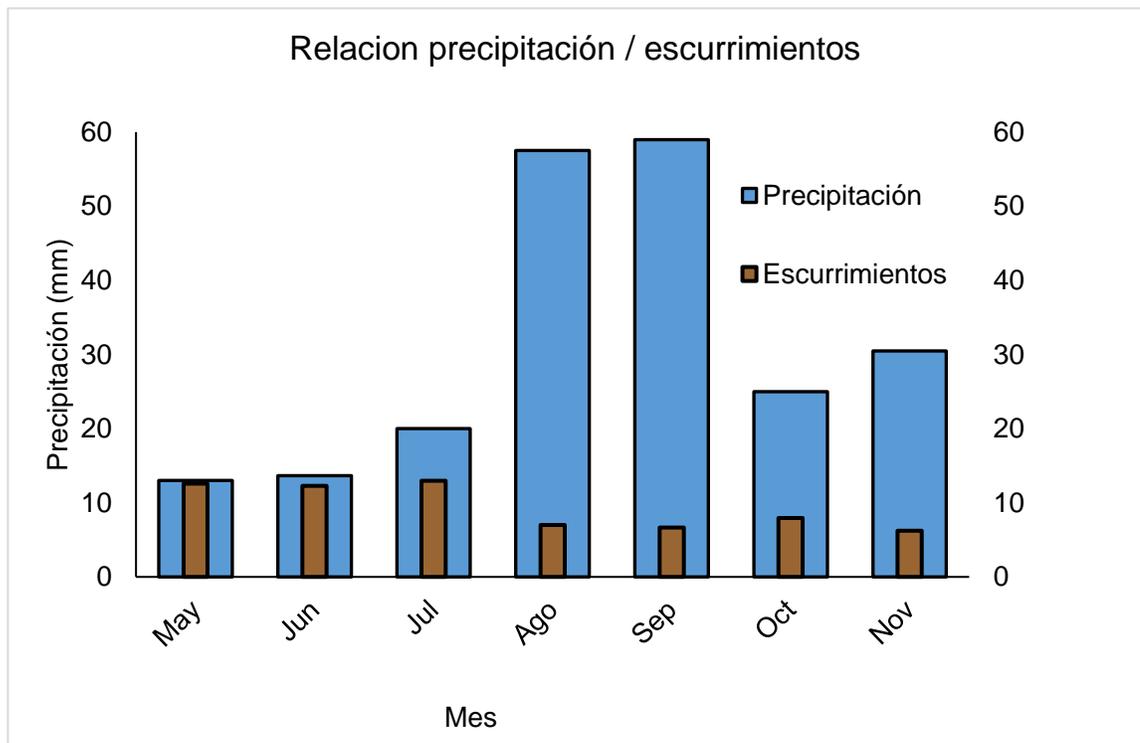


Figura 5. Relación de la precipitación con los escurrimientos dentro de la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.

En la Figura 6 se puede observar cómo se relacionan los escurrimientos cuando dependen de una variable como lo es el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). La relación positiva que se encontró entre NDVI y escurrimientos se deben a que los escurrimientos fueron estimados con base en la precipitación y los valores de NDVI tienen una relación directa y positiva con la precipitación (Figura 7). Metodológicamente es deseable que los escurrimientos puedan ser monitoreados físicamente in situ para que se pueda establecer una relación más realista con los valores de NDVI.

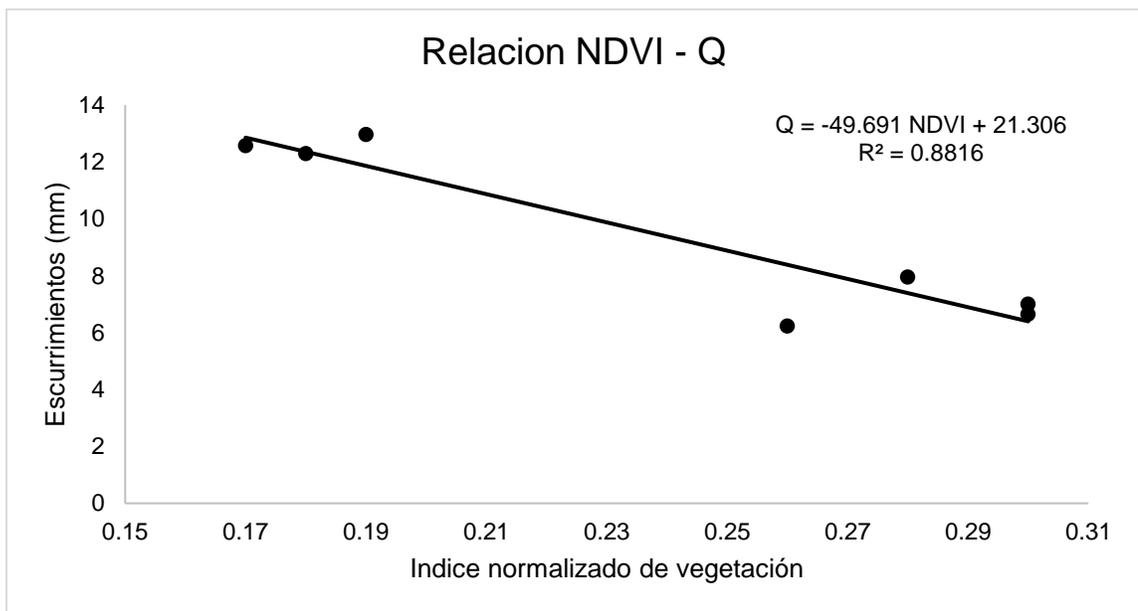


Figura 6. Relación cobertura de vegetación (NDVI) – Escurreimientos (Q) en la microcuenca San Luis del Cordero, Durango.

En la figura 7 se observa la correlación existente entre la precipitación pluvial (pp) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Se puede identificar una tendencia positiva, por lo que se infiere que al haber mayor precipitación el NDVI también aumentara en una proporción similar, los valores se ajustan a la línea de tendencia con una $R^2 = 0.7524$, que relaciona directamente estas dos variables medidas.

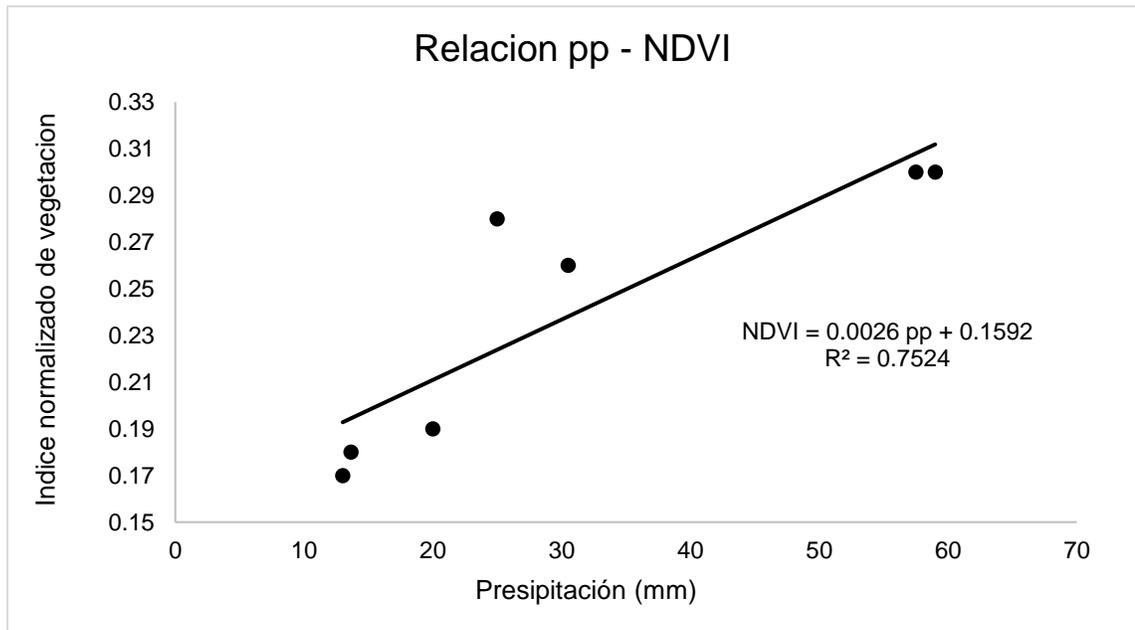


Figura 7. Relación precipitación – índice de vegetación (NDVI) en la microcuenca San Luis del Cordero, Durango

Se encontró que la precipitación pluvial (pp) ocurrida durante 2019 en la microcuenca fue menor (202.25 mm) y más errática que la pp media (345 mm). Pese a este decremento en la media de precipitación anual la superficie de la microcuenca con cobertura vegetal se mantuvo sin mayores cambios estadísticos significativos ($P \leq 0.05$) para los meses de junio y octubre de 2019 y enero de 2020, con valores de 89.23, 89.76 y 89.78 %, respectivamente como se muestra en la figura 8, las lluvias tuvieron su temporalidad de junio a noviembre, con una mayor precipitación registrada en los meses de agosto y septiembre dentro de la microcuenca.

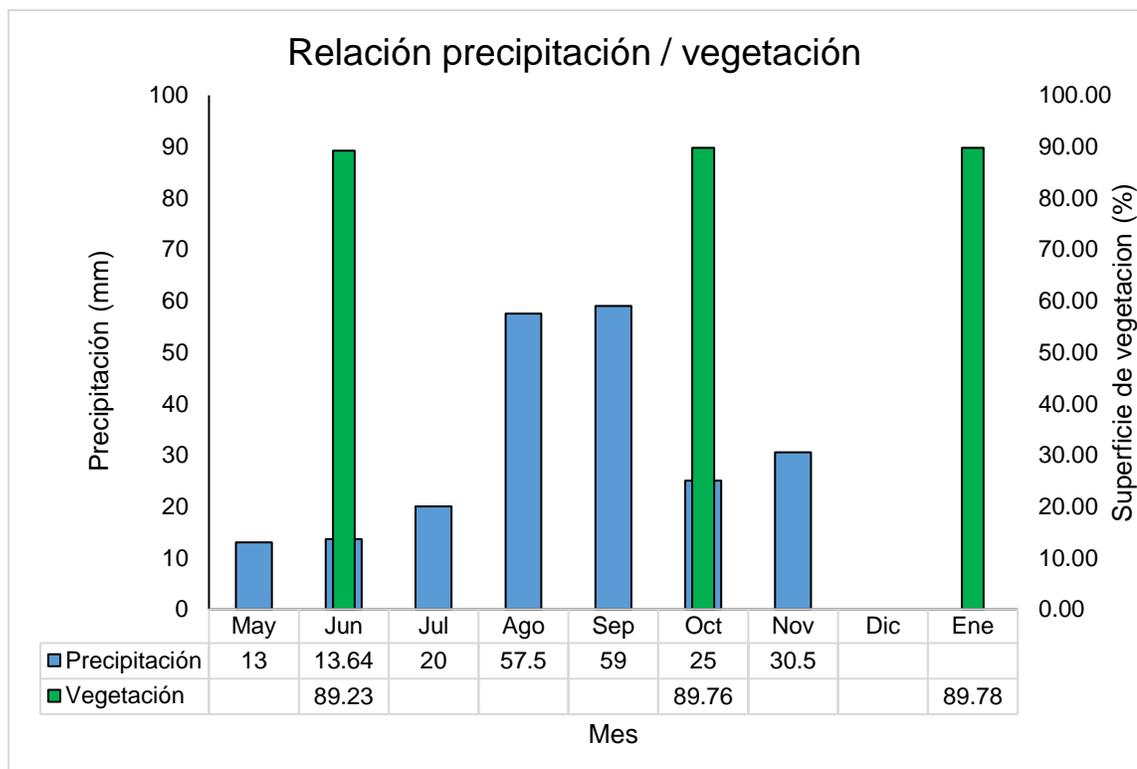


Figura 8. Relación de la cobertura vegetal con respecto a la precipitación en la cuenca de San Luis del Cordero, Dgo durante 2019.

La figura 9 presenta una relación inversamente proporcional, significativa entre el NDVI y la erosión. Así los mayores valores de erosión (0.4 ton ha^{-1}) estuvieron relacionados con los menores valores de NDVI (0.17). Los datos obtenidos de la regresión lineal muestran una $R^2 = 0.7613$.

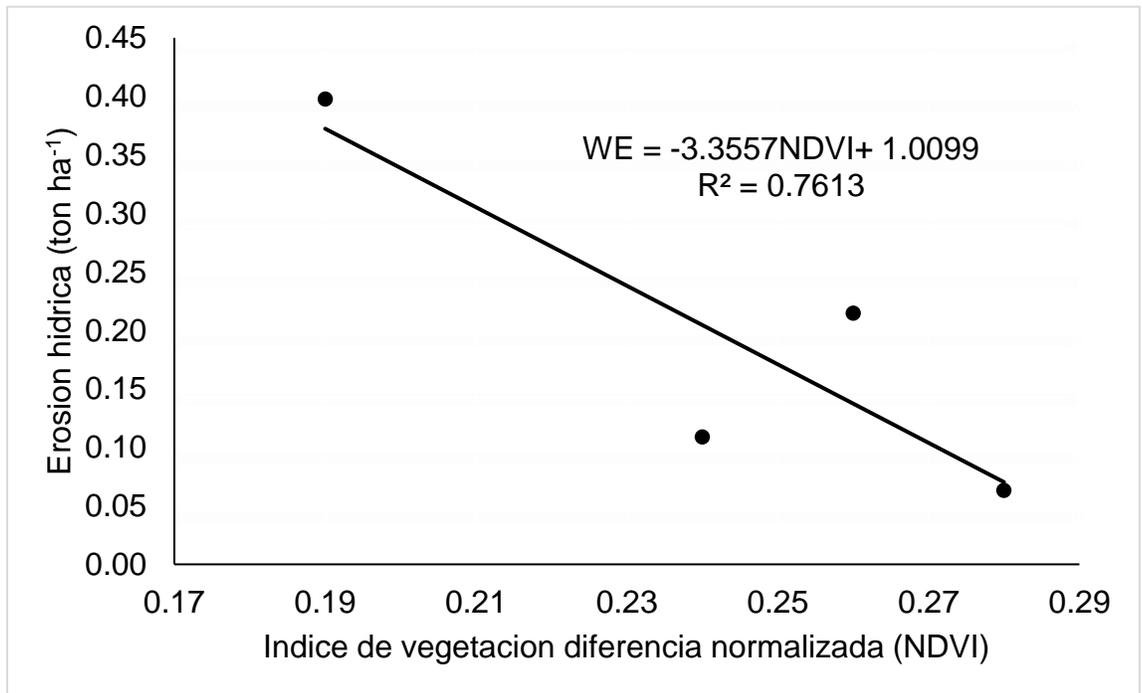


Figura 9. Relación entre el NDVI y la erosión hídrica (WE) en la cuenca San Luis del Cordero, Dgo.

Los resultados mostrados en el cuadro 10, indican que existen diferencias en los índices de valor de importancia entre las especies vegetales. Por diferencias de la parte alta de la cuenca, las especies relevantes fueron; sangre de grado (*Jatropha dioica*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*), San pedro o tronadora (*Tecoma stans*), Chaparro prieto (*Vachellia rigidula*), Maguey (*Agave durangensis*) y Chamizo (*Atriplex canescens*), entre los pastos de importancia que se encontraron fueron; Zacate navajita (*Bouteloua gracilis*), Zacate buffel (*Pennisetum ciliare*) y Zacate banderilla (*Bouteloua curtipendula*), de mayor a menor índice de valor de importancia, respectivamente.

En la parte media de la cuenca las especies con mayor presencia fueron, sangre de grado (*Jatropha dioica*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*), Chamizo (*Atriplex canescens*), Chaparro prieto (*Vachellia rigidula*), maguey (*Agave duranguensis*), además de algunos pastos de importancia Zacate navajita (*Bouteloua gracilis*), Zacate cola de zorra (*Alopecurus pratensis*) y Zacate banderilla (*Bouteloua curtipendula*).

Para el nivel de altura bajo se encontró gran presencia de sangre de grado (*Jatropha dioica*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*), Chaparro prieto (*Vachellia rigidula*), Chamizo (*Atriplex canescens*), maguey (*Agave duranguensis*) y gobernadora (*Larrea tridentata*), además de diferentes pastos que los encontrados en la parte alta y media de la subcuenca, Zacate borreguero (*Dasyochloa pulchella*), Zacate navajita (*Bouteloua gracilis*) y Zacate buffel (*Pennisetum ciliare*).

El índice de valor de importancia cambio con el tiempo en las diferentes especies vegetales que se encontraron en la cuenca. Particularmente las especies de la familia Poaceae incrementaron drásticamente su valor de importancia después de las lluvias. Algunas efímeras (*Freesia sp*, *Tagetes lucida* y *Euphorbia serrata*) también incrementaron su índice de valor de importancia con la presencia de lluvias. Por otra parte, la mayoría de las especies arbustivas perennes tendió a mantener su índice de valor de importancia e incluso disminuyó ligeramente en la temporada de lluvias.

Cuadro 10. Índice de valor de importancia por especie (variación espacio - temporal).

Especie		Índice de valor de importancia		
Nombre Común	Nombre Científico	Jun	Oct	Ene
Árnica	<i>Arnica montana</i>	0.00	2.64	0.00
Biznaga	<i>Mammillaria fraileana</i>	2.93	2.47	3.23
Biznaga de chilitos	<i>Mammillaria microhelia</i>	6.25	5.20	6.27
Biznaga morada	<i>Echinocereus rigidissimus</i>	3.40	2.02	3.08
Biznaga uña de gato	<i>Ferocactus latispinus</i>	3.44	0.00	0.00
Candelilla	<i>Euphorbia antisyphilitica</i>	26.79	19.64	25.30
Capulín	<i>Condalia mexicana</i>	52.24	59.21	45.48
Cardenche	<i>Cylindropuntia rosea</i>	136.44	106.72	117.75
Cenizo	<i>Leucophyllum frutescens</i>	79.16	69.05	73.77
Chamizo	<i>Atriplex canescens</i>	157.27	240.75	268.07
Chaparro prieto	<i>Vachellia rigidula</i>	257.00	239.69	282.07
Corona de cristo	<i>Euphorbia milii</i>	0.00	8.78	8.92
Corona de rey	<i>Glebionis segetum</i>	11.37	43.60	44.85
Cuervilla	<i>Ziziphus obtusifolia</i>	2.26	1.65	4.38
Engorda cabras	<i>Dalea bicolor</i>	9.95	28.22	17.40
Fresilla	<i>Freesia</i>	21.79	145.84	115.96
Gatuño	<i>Mimosa monancistra</i>	45.98	38.26	36.61
Gobernadora	<i>Larrea tridentata</i>	199.74	155.86	202.36

Nombre Común	Especie		Índice de valor de importancia		
	Nombre Científico		Jun	Oct	Ene
Helecho	<i>Blechnum chilense</i>		0.00	0.00	3.00
Hierba apestosa	<i>Viguiera stenoloba</i>		4.01	2.83	0.00
Hierba de la víbora	<i>Cissampelos pareira</i>		0.00	0.00	4.09
Hierva de la virgen	<i>Loeselia mexicana</i>		0.00	6.10	2.56
Lechona	<i>Euphorbia serrata</i>		9.38	35.15	52.67
Lechuguilla	<i>Agave lechuguilla</i>		607.19	453.67	589.59
Limilla	<i>Rhus microphylla</i>		6.45	7.87	5.41
Maguey	<i>Agave Durangensis</i>		223.07	190.81	252.54
Mariola	<i>Parthenium incanum</i>		3.11	0.00	0.00
Mezquite	<i>Prosopis ssp.</i>		17.92	14.49	15.18
Nopal cegador	<i>Opuntia microdasys</i>		6.84	4.62	5.77
Nopal de castilla	<i>Opuntia ficus-indica</i>		3.07	2.32	2.82
Nopal morado	<i>Opuntia gosseliniana</i>		24.80	12.71	15.26
Ocotillo	<i>Fouquieria splendens</i>		14.45	13.90	13.40
Orégano	<i>Origanum vulgare</i>		147.95	83.66	115.19
Oreja de ratón	<i>Dichondra argentea</i>		0.00	2.10	3.72
Orejón	<i>Plectranthus amboinicus</i>		18.18	7.69	6.32
Palo mulato	<i>Bursera simaruba</i>		0.00	2.67	0.00

Nombre Común	Especie Nombre Científico	Índice de valor de importancia		
		Jun	Oct	Ene
Pezuña de vaca	<i>Bauhinia forficata</i>	3.48	0.00	0.00
Pitayo	<i>Stenocereus queretaroensis</i>	3.42	0.00	0.00
San pedro	<i>Tecoma stans</i>	292.02	163.75	121.20
Sangre grado	<i>Jatropha dioica</i>	947.03	586.86	751.80
Tasajillo	<i>Cylindropuntia leptocaulis</i>	102.32	59.73	61.43
Tatalencho	<i>Gymnosperma glutinosum</i>	14.57	2.27	0.00
Trébol	<i>Medicago polymorpha</i>	3.13	0.50	0.00
Uña de gato	<i>Antennaria Dioica</i>	0.00	1.98	0.00
Vara dulce	<i>Lignum nephriticum</i>	14.68	5.21	0.00
Vara prieta	<i>Acacia constricta</i>	14.28	2.44	0.00
Verdolaga	<i>Portulaca oleracea</i>	0.00	55.16	0.00
Yerbaníz	<i>Tagetes lucida</i>	9.08	53.08	0.00
Zacate amor	<i>Eragrostis curvula</i>	0.00	13.76	6.32
Zacate banderilla	<i>Bouteloa curtipendula</i>	20.80	78.74	0.00
Zacate borreguero	<i>Dasyochloa pulchella</i>	3.70	75.24	108.82
Zacate buffel	<i>Pennisetum ciliare</i>	27.68	49.41	68.34
Zacate cola de zorra	<i>Alopecurus pratensis</i>	0.00	97.13	11.85
Zacate lobero	<i>Muhlenbergia phleoides</i>	3.13	54.10	5.41
Zacate navajita	<i>Bouteloua gracilis</i>	38.25	166.16	93.27
Zacate pegarropa	<i>Setaria adherens</i>	0.00	31.73	0.00
Zacate tres barbas	<i>Aristida divaricata</i>	0.00	65.56	23.06

3.4. CONCLUSIÓN

No se identificó variación estacional de la cobertura vegetal, pero se detectó que la parte baja de la cuenca tendió a mantener mayores coberturas en comparación con la parte alta. Además, se encontró una fuerte relación positiva entre la precipitación y el NDVI, ambas variables aumentan proporcionalmente.

La metodología para el cálculo de esorrentías Q fue la correcta y se obtuvieron los valores correspondientes, sin que los valores de esorrentía fueran mayores a cada evento de lluvia. Las esorrentías tienen una alta correlación inversamente proporcional con respecto al índice normalizado de diferencia de vegetación, indicando que a mayor índice normalizado de vegetación las esorrentías disminuyen gradualmente.

Aun cuando, la cobertura vegetal en general parece mantenerse más o menos constante a través del año, la composición de la vegetación cambia después de las lluvias. Esto se confirmó con los mayores índices de valor de importancia. Se confirmó que las gramíneas aumentan su índice de valor de importancia después de las precipitaciones, en tanto que las arbustivas perennes permanecieron con los mismos valores e incluso en algunas de ellas el índice disminuyó.

La erosión hídrica que se midió en la cuenca disminuyó de manera proporcional coincidiendo con el aumento indicado en el índice normalizado de diferencia de vegetación, indicando así, una correlación inversamente proporcional, con el aumento en la vegetación disminuye la cantidad de sedimentos en la microcuenca.

En las imágenes obtenidas mediante el uso del dron, con la creación del ortomosaico puede observarse el estado de la subcuenca en dos diferentes temporadas del año, en donde se obtuvo una similitud de los datos duros obtenidos y que concuerdan con los datos que se recabaron en las mediciones de los muestreos "*in situ*".

3.5. LITERATURA CITADA

- Acker, J., y Leptoukh, G. (2007). El análisis en línea mejora el uso de datos de ciencias de la tierra de la NASA. *Eos, Trans. AGU.*, Vol. 8, No. 2. Pp. 14 y 17.
- Aguiar, M.R. & Sala, O.E. (1999). Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Tree*, 14(7), 273-277
- Aranque, L., y Jimenez, A. (2009). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. *PALMAS* Vol. 30 No. 3. Pp. 79.
- Belmonte, F., y Romero, A. (1998). La cubierta vegetal en las regiones áridas y semiáridas: consecuencias de la interceptación de la lluvia en la protección del suelo y los recursos hídricos. Departamento de geofísica, Universidad de Murcia. España. Pp. 14.
- Beltrán, E. (2012). Matorral xerófilo. Facultad de estudios superiores Iztacala. Museo de las ciencias biológicas Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 1-18.
- Cárdenas, S. (2006). Conferencia Magistral sobre degradación de los suelos, En: Congreso de suelos, Instituto de Suelo, La Habana
- Cervantes, L. y Domínguez, R. (1988). Relación lluvia escurrimientos en un sistema pequeño de cuencas de la selva baja caducifolia. Instituto de biología, UNAM, Instituto de ingeniería, UNAM. Ingeniería hidráulica en México. Pp. 42

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2020). Inventario de registros por década año. Datos por estación.
- Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), (2006). El agua en México. México, www.cna.gob.mx. ISBN: 968-817-730-X
- Cotter, H. (Comp.)(2007). El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Cuevas, M., Garrido, A., Pérez, J., y Iura, D. (2009). Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. Atlas de cuencas.
- Dekker, S.C. ; Rietkerk, M. & Bierkens, M.F.P. (2007). Coupling microscale vegetation-soil water and macroscale vegetation-precipitation feedbacks in semiarid ecosystems. *Global Change Biology* 13, 671-678
- Drone visión, (2018). Drones para fotogrametría. Drone visión professional aerial solutions. Sevilla, España.
- Espinosa, R., Andrade, L., Rivera, O., y Romero D. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 53-54: Pp. 77-88.
- Esquivel, G., Bueno, P., Sánchez, I., Velázquez, M., y Muñoz, J. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del norte-centro de México. *Agrofaz*, 15 (2), Pp. 151-161.

- Febles, J., y Durán J. (1988). Manual de erosión y conservación de los suelos, Departamento de Ediciones del ISCAH, La Habana. Pp. 63
- Flores, H., Martínez, E., Oropeza, M., Mota, J.; Mejía, E., y Carrillo, R. (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 2. Pp. 233-244.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). World reference base for soil resources 2014. Update 2015. ISSN 0532-0488. Pp. 145.
- Gaspari, F. (2002). Ordenamiento territorial en cuencas serranas. aplicación de sistemas de información geográfica (S. I. G.). Argentina: Ediciones Cooperativas. Pp. 147
- González, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. Instituto Nacional de ecología, Pp. 105 – 108.
- Granados, D., Hernández, M., Vázquez, A., y Ruiz, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente. versión On-line ISSN 2007-4018 versión impresa.
- Ibáñez, S., Moreno, H., y Gilbert, J. (2010). Valores de numero de curva: cálculo de escorrentía. Universidad Politécnica de valencia. Producción Vegetal.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.
Pp. 11.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, (INECC). (2011). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Estado de México. Pp. 40.

Leal, Z., Díaz, J., Schiettecatte, M., y Almoza, Y. (2007). Efecto de la cobertura vegetal de cultivos agrícolas principales sobre el proceso de erosión en suelos de la cuenca del río Cuyaguatzeje. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 16, No. 3. Pp. 76 – 83.

León, A. J., Hernández, A., Garrido, M. & Andalia, A. (2013). Captación de lluvia y pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento. Centro de investigaciones hidráulicas, CUJAE, vol. 32, núm. 2. ISSN 1680-0338

López, E., Pellat, F., Martínez, M., Ríos, J., y Bolaños, M. (2011). Uso De Sensores Remotos En La Modelación Precipitación-Escorrentamiento. Revista Terra Latinoamericana 29: 387-98.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321283007>.

Malagnoux, M., Sène, E., y Atzmon, N. (2007). Bosques, árboles y agua en las tierras áridas: un equilibrio delicado. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

Meneses, C. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. FAO/C. PALMBERG-LERCHE, Unasylva 238, Vol. 62. Pp. 39 – 46.

- Minitab, (2019). Cómo Interpretar los Resultados del Análisis de Regresión: Valores P y Coeficientes. Minitab Blog Editor.
- Moreno, A.D. & Renner, I. eds. (2007). Gestión integral de cuencas, la experiencia del proyecto regional cuencas andinas. Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú. 236 pp.
- Mostacedo, B. & T. Fredericksen. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Proyecto de manejo forestal sostenible (BOLFOR). Santa Cruz, Bolivia Pp. 12.
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales. Pp. 7 – 9.
- Osterkamp, W.R., Hupp, C.R., Stoffel, M. (2011). The interactions between vegetation and erosion: new directions for research at the interface of ecology and geomorphology. *Earth Surface processes and Landforms* 37(1):23-36
- Thompson, S.E., Katul, G., Konings, A., Ridolfi L., (2011). Unsteady overland flow on flat surfaces induced by spatial permeability contrasts. *Advances in Water Resources*. 34(8), 1049–1058
- PIX4D, (2021). LiDAR: Que es y que utilidad tiene para la fotogrametría. legal@pix4d.com
- Raunkiaer, C. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography*. Clarendon Press, Oxford. Pp. 632

- Restrepo, G. (1985). Desarrollo de la reforestación y programas de investigación forestal en la costa Atlántica de Colombia. Segundo encuentro nacional C. I. I. D. América latina y el caribe, Santiago de Chile. Pp. 85.
- Sánchez, A., García, R. & A. Palma. (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de los recursos naturales. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Primera edición.
- Sánchez, I., Velázquez, M., Jasso, R., y Gonzales, J. (2003). Caracterización de la retención máxima de humedad en el suelo del método SCS-CN. Aplicación en una cuenca de México. Ingeniería hidráulica en México. Vol. 18, núm. 3 Pp. 111-117
- Sánchez Velez, A.S., García Nuñez, R.M., Palma Trujano, A. (2003). La cuenca hidrográfica. Unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Serie alternativas Productivas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Scandinavian Dron AB. (2021). Usos de la tecnología LiDAR. PIX4D® empresa legal@pix4d.com
- Schiettecatte, W. (2005). Assessment of sediment and phosphorus transport from laboratory to watershed scale, Universidad de Gent,
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2020). Base de datos climatológica. Datos por estación.

United States Department Of Agriculture-Soil Conservation Service (USDA–SCS). (1972). National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology. USDA-SCS. Washington, D.C.

Velásquez, M., Esquivel, G., Sánchez, I., Castillo, D., Cano, A., y Gutiérrez, R. (2007). Comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca de uso silvopastoril en el sureste de Coahuila. *Revista mexicana de ciencias forestales*. Pp. 143 - 164.

Wischmeier, W. y Smith. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. US Department of Agriculture. Washington, DC.

Zhao, H., Wu, Q., Liu, G., 2001. Mechanism on soil and water conservation of forest vegetation on the loess plateau. *Scientia Silvae Sinicae* 37 (5), 140–144

Zarco, V., Valdez, J., Angeles, G., y Castillo, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación del parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. 26(1). Pp. 1-17.