



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DINÁMICA HIDROLÓGICA EN LA SUBCUENCA
SISTEMA LACUSTRE DE PLANICIE, CHIAPAS EN EL
PERÍODO 2014 - 2015”**

T E S I S

Que para obtener el título de:

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Presenta:

Marieli Juárez Pérez

Directora de Tesis:

Dr. Lucy Natividad Mora Palomino



Ciudad Universitaria, CD. MX., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco a mi segunda casa la Universidad Nacional Autónoma de México - Facultad de Ciencias por la oportunidad de forjarme un pensamiento crítico y reflexivo.

A mi asesora la Dra. Lucy Mora por brindarme la oportunidad de ser parte del proyecto “AELT - Efectos del cambio global y climático sobre la Limnología y biodiversidad Acuática (IV200122)”, por sus aportes y comentarios a lo largo del proceso. Pero sobre todo por su comprensión, motivación y confianza en mis capacidades, por presentarme a las personas que formaron parte de mi aprendizaje durante el proceso de elaboración de este trabajo de investigación.

Al Dr. Óscar Escolero por compartirme su información, conocimiento y apoyo, además de su orientación para desarrollar el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Agustín Robles por brindarme su tiempo e interés en fomentar mi aprendizaje.

A mis sinodales: Dr. Javier Alcocer, Dra. Lyssette Muñoz y Dra. Selene Olea por sus comentarios, aportaciones e interés en esta investigación.

A todas las personas anteriormente mencionadas, un especial agradecimiento por haberme brindado el privilegio de compartir sus conocimientos conmigo.

Dedicatorias

A mis padres, por su apoyo, dedicación y comprensión, sin ustedes no hubiese podido lograr alcanzar mis metas.

A mis hermanas, que siempre me alentaron para seguir esforzándome a culminar esta hermosa etapa de mi vida.

A mis profesores, porque ustedes fomentaron mi aprendizaje y amor por la ciencia.

A mis amigos, quienes siempre estuvieron a mi lado apoyando y alentando a seguir adelante.

A las personas que conocí durante la elaboración de dicho trabajo, quienes me ayudaron desinteresadamente a resolver mis dudas; de ustedes aprendí a brindar apoyo con la finalidad de difundir el conocimiento. Esperando algún día ser la persona que comparte su conocimiento con otros.

Índice

Glosario	1
Resumen	3
Abstract	5
1. Introducción	7
1.1 Antecedentes	7
1.2 Justificación	8
1.3 Hipótesis	9
1.4 Objetivos	10
2. Marco teórico	11
2.1 Cuenca hidrográfica	11
2.2 Balance hidrológico superficial	12
2.3 Precipitación	13
2.3.1 Medición de la precipitación	13
2.3.2 Estaciones meteorológicas	13
2.3.3 Base de datos para el análisis de precipitación mediante teledetección satelital	14
2.4 Evapotranspiración	15
2.4.1 Evapotranspiración potencial	15
2.4.2 Evapotranspiración real	16
2.5 Escorrentía	17
2.5.1 Método área-velocidad media para medición de caudales	17
2.5.2 Secciones de aforo para medición de caudal	17
2.5.3 Ecuación de Manning	19
2.5.4 Sensores de presión para medición de caudales	20
2.5.5 Modelo método racional para determinar la escorrentía superficial	20
3. Descripción del área de estudio	24
3.1 Localización	24
3.2 Clima	24
3.2.1 Temperatura	25
3.2.2 Precipitación	26
3.3 Hidrología	27
3.4 Geología y geomorfología	28

3.5	Uso de suelo y vegetación	29
4.	Metodología.....	31
4.1	Recopilación de información	31
4.2	Balance hidrológico a escala subcuenca.....	31
4.3	Precipitación.....	31
4.3.1	Selección de datos	31
4.3.2	Procesamiento de datos.....	33
4.3.3	Validación de datos.....	34
4.4	Evapotranspiración potencial y real	35
4.5	Escurrimiento superficial.....	35
4.5.1	Selección de sitios de monitoreo	35
4.5.2	Medición de caudal a partir de aforos.....	37
4.5.3	Monitoreo de caudales	37
4.5.4	Calibración de los datos de caudal	38
4.6	Variaciones de volumen en el sistema lacustre.....	38
4.7	Determinación del período de estudio	39
4.8	Estimación de caudal por método racional	42
4.8.1	Coefficiente de escurrimiento (Ce).....	44
4.8.2	Curvas Intensidad - Duración – Frecuencia (IDF)	44
4.9	Comparación de métodos: área – velocidad y racional	45
5.	Resultados.....	47
5.1	Precipitación.....	47
5.1.1	Análisis a escala temporal.....	50
5.1.2	Análisis a escala estacional	52
5.2	Estimación de escurrimiento superficial.....	55
5.2.1	Estimación de caudal mediante el método de aforo	56
5.2.2	Estimación del caudal por el método área-velocidad	56
5.3	Estimación de balance hidrológico en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie	60
5.4	Estimación de caudal superficial por el método racional	64
6.	Discusión de resultados	70
6.1	Precipitación.....	70
6.1.1	Estimación de la precipitación con CHIRPS.....	70

6.1.2 Desempeño de CHIRPS ajustado para estimar la precipitación temporal y estacional	71
6.2 Caudal superficial por el método área-velocidad.....	72
6.3 Balance hidrológico a escala subcuenca	73
6.4 Caudal superficial por el método racional	75
7. Conclusiones.....	78
7.1 Sugerencias y recomendaciones.....	78
8. Referencias	80
9. Anexos.....	87
Anexo I.....	87
ANEXO II.....	93
ANEXO III	94
ANEXO IV	104

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Ancho de los segmentos en función del ancho de la corriente.....	18
Tabla 4.1 Estación meteorológica ubicada dentro de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, México.	33
Tabla 4.2 Comparación de precipitación diaria (mm) estimada por CHIRPS con respecto a la estación meteorológica Lagunas de Montebello.....	33
Tabla 4.3 Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas.	45
Tabla 5.1 Análisis estadístico de la precipitación diaria (mm) en la estación meteorológica Lagunas de Montebello, CONAGUA, durante el período: enero de 2014 a diciembre de 2015. .47	47
Tabla 5.2 Datos de temperatura (°C) y precipitación mensual (mm) y anual (mm) en la estación meteorológica Lagunas de Montebello, Servicio Meteorológico Nacional (SMN), CONAGUA (período 2014-2015).....	48
Tabla 5.3 Validación de precipitación acumulada (mm) estimada a resolución diaria y mensual por CHIRPS.....	49
Tabla 5.4 Valores de sesgo medio (B) para datos diarios y mensuales de precipitación (mm) en la estación de monitoreo Lagunas de Montebello, Chiapas.	50
Tabla 5.5 Validación de precipitación acumulada (mm) a resolución diaria y mensual con datos CHIRPS ajustado.	52
Tabla 5.6 Validación de precipitación diaria (mm) a escala estacional para CHIRPS ajustado. .53	53

Tabla 5.7 Validación de precipitación mensual (mm) a escala estacional para CHIRPS y CHIRPS ajustado.....	53
Tabla 5.8 Aforos correspondientes al sitio de monitoreo El Carrizal.....	56
Tabla 5.9 Aforos correspondientes al sitio de monitoreo Paso del Soldado.....	56
Tabla 5.10 Estimación del caudal mensual (m^3/s) en el sitio de monitoreo El Carrizal a partir de las variables de área y velocidad.....	57
Tabla 5.11 Estimación del caudal mensual (m^3/s) en el sitio de monitoreo Paso del Soldado a partir de las variables de área y velocidad.....	58
Tabla 5.12 Balance hídrico en el suelo para la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie con el método de Thornthwaite.....	61
Tabla 5.13 Balance hidrológico para la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie.....	62
Tabla 5.14 Estimación del factor K a partir del uso de suelo y vegetación de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.....	64
Tabla 5.15 Valores anuales estimados para el coeficiente de escurrimiento (C_e) en la subcuenca de estudio a partir de valores de precipitación registrados en las estaciones.....	66
Tabla 5.16 Variables para el cálculo de la intensidad (mm/h) en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.....	66
Tabla 5.17 Comparación de caudales máximos mensuales (m^3/s) estimados con el método racional en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.....	67
Tabla 5.18 Comparación de caudales máximos mensuales (m^3/s) estimados a partir de los métodos racional y área – velocidad en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.....	68

Índice de Figuras

Figura 2.1 Principales variables biofísicas de una cuenca hidrográfica.....	12
Figura 2.2 División del ancho del cauce en secciones.....	19
Figura 3.1 Ubicación de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, México.....	24
Figura 3.2 Unidades Climáticas de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, México.....	25
Figura 3.3 Temperatura media de estaciones meteorológicas analizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).....	26
Figura 3.4 Precipitación media de estaciones climatológicas analizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).....	27
Figura 3.5 Ubicación del sistema lacustre: Parque Nacional Lagunas de Montebello.....	28
Figura 3.6 Rasgos geológicos del sistema lacustre de Montebello, Chiapas, México.....	29

Figura 4.1 Localización de la estación meteorológica Lagunas de Montebello en el municipio La Trinitaria, Chiapas, México.	32
Figura 4.2 Ubicación de los sitios de monitoreo para estimar el escurrimiento superficial a lo largo del Río Grande de Comitán, en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.	36
Figura 4.3 Mapa de elementos estructurales propuestos en el sistema lacustre de Montebello, Chiapas.	37
Figura 4.4 Diagrama del proceso de balance hidrológico para precipitación y evapotranspiración real.	40
Figura 4.5 Diagrama del proceso de balance hidrológico para escurrimiento superficial.	41
Figura 4.6 Diagrama del proceso de balance hidrológico en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie.	42
Figura 4.7 Datos de entrada para la estimación de caudal con el método racional: A) Usos de Suelo y Vegetación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, B) Mapa de delimitación de la subcuenca hidrográfica Sistema Lacustre de Planicie.	43
Figura 4.8 Diagrama del proceso de Método Racional.	46
Figura 5.1 Climograma de la estación meteorológica Lagunas de Montebello, para el período: enero de 2014 a diciembre de 2015. Nota. La temperatura del aire (°C) representada por la línea roja. La precipitación (mm) en columnas grises.	48
Figura 5.2 Histograma de precipitación acumulada diaria (mm) registrada in situ (Est. Meteorológica) y simulada (CHIRPS) en la estación Lagunas de Montebello, Chiapas.	49
Figura 5.3 Series de precipitación acumulada (mm) registrada en la estación meteorológica (in situ) y CHIRPS (píxel) y CHIRPS ajustado (CHIRPS Aju) en la estación de monitoreo Lagunas de Montebello. A) Escala diaria, B) Escala mensual.	51
Figura 5.4 Gráfico de precipitación acumulada diaria (mm) estimada por la estación meteorológica, CHIRPS y CHIRPS ajustado (CHIRPS Aju) en diagrama de cajas correspondientes a la estación de monitoreo Lagunas de Montebello.	54
Figura 5.5 Gráfico de precipitación acumulada mensual (mm) en diagrama de cajas correspondientes a la estación de monitoreo Lagunas de Montebello. A) Estación meteorológica y CHIRPS, B) Estación meteorológica y CHIRPS ajustado (CHIRPS Aju).	55
Figura 5.6 Hidrograma de caudal medio mensual (m^3/s) en el sitio de monitoreo El Carrizal.	57
Figura 5.7 Hidrograma de caudal medio mensual (m^3/s) en el sitio de monitoreo Paso del Soldado.	59
Figura 5.8 Caudal medio mensual estimado en El Carrizal y Paso del Soldado en diagrama de caja y bigotes.	60
Figura 5.9 Mapa de uso de suelo y vegetación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.	65

Figura 5.10 Comparación de caudales máximos superficiales estimados para subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Nota. MR-Est. Meteorológica= caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método racional a partir de valores de precipitación acumulada (mm) mensual registrados en la estación Lagunas de Montebello. MR-CHIRPS Aju= caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método racional a partir de datos de precipitación acumulada (mm) mensual estimados con CHIRPS ajustado. El Carrizal= caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método área-velocidad en el sitio El carrizal. Paso del Soldado = caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método área-velocidad en el sitio Paso del Soldado.68

Figura 6.1 Diagrama del balance hidrológico de octubre 2014 a marzo 2015, estimación de entradas y salidas en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Nota. La orientación de las flechas indica la entrada y salida de agua de la subcuenca.74

Figura 6.2 Gráfica del uso de suelo y vegetación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.76

Glosario

Aforo: medidas realizadas en la sección transversal de un cauce para calcular datos de caudal.

Ancho de la superficie libre o espejo (T): es el ancho de la sección del canal, medido al nivel de la superficie libre, m.

Área hidráulica (A): corresponde a la sección transversal ocupada por el flujo en un canal, m²

Calidad de agua: la capacidad intrínseca que tiene el agua para responder a los usos que se podrían obtener de ella.

Cauce: canal natural o artificial a lo largo o a través del cual puede fluir el agua.

Cauce principal: el canal principal que capta y conduce el agua hasta la descarga de una cuenca.

Caudal: volumen de agua que atraviesa un área superficial en un tiempo determinado. Cantidad de agua que lleva una corriente.

Capacidad de Campo: contenido de agua retenido por un suelo en contra de la gravedad.

Erosión: proceso que implica la degradación progresiva de la superficie del suelo por acción de agentes externos como el aire y el agua.

Perímetro de mojado (Pm): es la longitud de contacto entre el agua y la superficie mojada del canal, m.

Precipitación en exceso o efectiva: corresponde a la parte de la precipitación que contribuye al escurrimiento superficial.

Precipitación útil: lluvia que se infiltra en el suelo, sin llegar a perderse por escorrentía profunda y permanece a disposición de las raíces de las plantas.

Radio hidráulico (R_h): Medida que se utiliza para medir el efecto de la forma del canal y es el cociente del área hidráulica y su perímetro mojado, m.

Recursos hídricos: son los cuerpos de agua que están disponibles o potencialmente disponibles en el planeta, estos pueden ser utilizados por el ser humano para satisfacer alguna necesidad.

Reservorio de agua: el agua contenida en las diferentes etapas del ciclo hidrológico.

Saturación: contenido de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua.

Subcuenca: fracción de una cuenca hidrológica, que corresponde a la superficie tributaria de un afluente o de un sitio seleccionado.

Teledetección: técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales.

Tirante de agua o profundidad de flujo (y): es la distancia vertical medida desde la superficie libre del agua al punto más bajo de la sección transversal, es decir la profundidad máxima.

Valle ciego: valle donde el curso de agua superficial desaparece en un sumidero kárstico, a menudo se adapta a fracturas.

Resumen

En este trabajo se propone un estudio a detalle de las variables físicas (clima, hidrología y morfología) y biológicas (suelo, vegetación y usos de suelo) que favorecen la dinámica hidrológica de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas para el período 2014-2015, con el objetivo de cuantificar el escurrimiento superficial y subterráneo a partir de un balance hidrológico e identificar la época del año con mayor escurrimiento.

En un primer acercamiento, se investigó la variabilidad temporal de la precipitación, la evapotranspiración y el escurrimiento superficial en la subcuenca, se observó que la información presenta limitaciones importantes. Existe una sola estación meteorológica ubicada dentro de la subcuenca que no estima evapotranspiración. Además, las mediciones de caudal no cuentan con registros continuos durante el periodo de estudio, generando discontinuidad en la información.

El estudio de la dinámica temporal de la precipitación se llevó a cabo con la información de la estación meteorológica “Lagunas de Montebello” ubicada en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, la cual se compara con respecto a los datos de precipitación estimados por el modelo CHIRPS durante el período 2014 a 2015 para el mismo sitio. Los datos de CHIRPS a escala diaria y mensual fueron ajustados a partir del cálculo de sesgo local (B) diario y mensual y después validados con los índices r, RMSE y NSE. Los datos CHIRPS ajustados a escala temporal -mensual y diaria- y estacional -época húmeda (junio a noviembre) y seca (diciembre a abril)- no representan adecuadamente la variabilidad estacional de la precipitación en la subcuenca.

La evapotranspiración real (ETR) se estimó a partir del balance hídrico que utilizó como datos de entrada, la precipitación registrada en la estación meteorológica y la evapotranspiración potencial estimada por el método Thornthwaite. Se consideró una reserva hídrica de suelo igual a 370 mm. Únicamente se registra un déficit de agua mayor a 40 mm durante los meses de abril a mayo de 2014. Se estimó una ETR anual en el 2014 de 729.6 mm y de 819.2 mm para el 2015.

Se estimó el escurrimiento superficial promedio y máximo a partir del método área-velocidad con base en mediciones de aforos y sensores de presión en dos sitios de monitoreo ubicados en la subcuenca: El Carrizal (entrada) y Paso del Soldado (salida). Se observó que el escurrimiento que ingresa al sistema lacustre es mayor que el que drena del sistema durante los meses de lluvia, sin embargo, durante la época de secas no existe gran diferencia entre las entradas y salidas. Se comparan los resultados anteriores con el método racional para escenarios en donde no se tiene información de aforos. Se observó que el método racional sobrestima las estimaciones de caudal máximo en la subcuenca, debido a que el modelo no considera el uso de suelo y vegetación, la demanda de los recursos hídricos y la relación estacional del río-acuífero. Se realizó un balance hidrológico para el período de octubre 2014 a marzo 2015, en este balance se identifican 3 tipos de entrada: el 42.8 % está representado por la precipitación local, el 25% por escurrimiento superficial desde la parte alta de la subcuenca y 24.9% corresponde a escurrimiento subterráneo. De las salidas se identifica que el 40.9% se moviliza por ETR total, 58.7% drena por escurrimiento superficial hacia otras zonas, y el resto queda almacenado en los lagos.

A partir de los resultados obtenidos, se estimó una recarga por escurrimiento subterráneo al sistema lacustre durante la época seca. Por otra parte, se identifica a octubre como el mes de máximo escurrimiento superficial en la subcuenca.

Abstract

This study proposes a detailed study of the physical (climate, hydrology, and morphology) and biological (soil, vegetation, and land use) variables that favor the hydrological dynamics of the Lacustrine Plain System sub-basin, Chiapas, for the period 2014-2015, with the objective of quantifying surface and underground runoff from a hydrological balance and identifying the time of year with the highest runoff.

In a first approach, the temporal variability of precipitation, evapotranspiration, and surface runoff in the sub-basin was investigated, and it was observed that the information presents important limitations. There is only one meteorological station located within the sub-basin that doesn't estimate evapotranspiration. In addition, the flow measurements don't have continuous records during the study period, generating discontinuity in the information.

The study of the temporal dynamics of precipitation was carried out with information from the "Lagunas de Montebello" meteorological station located in the Lacustrine Plain System sub-basin, which is compared with respect to the precipitation data estimated by the CHIRPS model during the period 2014 to 2015 for the same site. Daily and monthly CHIRPS data were adjusted based on the daily and monthly calculation of local bias (B) and subsequently validated with the r, RMSE, and NSE indices. The CHIRPS data adjusted to a temporal scale -monthly and daily- and seasonal -wet season (June to November) and dry season (December to April)- don't adequately represent the seasonal variability of precipitation in the sub-basin.

The real evapotranspiration (ETR) was estimated from the water balance that used as input data the precipitation registered at the meteorological station and the potential evapotranspiration estimated by the Thornthwaite method. A soil water reserve equal to 370 mm was considered. Only a water deficit greater than 40 mm is recorded during the months of April to May 2014. An annual ETR was estimated in 2014 of 729.6 mm and 819.2 mm for 2015.

Average and maximum surface runoff were estimated using the area-velocity method based on gauging measurements and pressure sensors at two monitoring sites located in the sub-basin: El Carrizal (inlet) and Paso del Soldado (outlet). It was observed that the runoff that enters the lacustrine system is greater than that drains from the system during the rainy months, however, during the dry season, there is no great difference between the inputs and outputs. The previous results are compared with the rational method for scenarios where there is no information on gauging. It was observed that the rational method overestimates the estimates of maximum flow in the sub-basin because the model does not consider the use of soil and vegetation, the demand for water resources, and the seasonal relationship of the river-aquifer. A hydrological balance was carried out for the period from October 2014 to March 2015, in this balance three types of input are identified: 42.8% is represented by local precipitation, 25% by surface runoff from the upper part of the sub-basin and 24.9% corresponds to underground runoff. Of the outlets, it is identified that 40.9% is mobilized by total ETR, 58.7% drains by surface runoff to other areas, and the rest is stored in the lakes.

Based on the results obtained, a recharge by underground runoff to the lacustrine system during the dry season was estimated. On the other hand, October is identified as the month of maximum surface runoff in the sub-basin.

1. Introducción

A pesar de que nuestro planeta está cubierto por agua, los seres humanos solo podemos utilizar una proporción muy pequeña, asociada a las áreas continentales. Las sociedades humanas involucran en mayor frecuencia los reservorios naturales de agua dulce; para poder desarrollar y mantener el crecimiento económico, a través de actividades industriales, agrícolas, agropecuarias, turísticas y generación de energía (Walter, 2010). Sin embargo, los recursos hídricos presentan variaciones en cantidad, calidad y asequibilidad.

México se caracteriza por presentar una gran variedad de climas que han clasificado al país en dos regiones: áridas o semiáridas (dos terceras partes del territorio nacional) al norte del país y al sureste en húmedo con precipitaciones anuales mayores a 2,000 mm por año en algunas zonas (CONAGUA, 2008). La región sureste es considerada como la zona con mayor disponibilidad de agua, sin embargo, la variación espacio-temporal de los procesos de circulación del agua (evapotranspiración, precipitación, escurrimiento superficial y subterráneo) generan variaciones en la disponibilidad del agua a escala local.

El país cuenta con información climatológica e hidrológica que permite estudiar la reserva de agua en distintos cuerpos. Dicha información es indispensable para comprender y conocer la distribución y movimiento del agua de un reservorio a otro, así como el estado actual de la disponibilidad y demanda del recurso hídrico (Ordoñez, 2011).

En este contexto, el estudio de la dinámica hidrológica superficiales y subterráneas a escala subcuenca es importante para comprender como los recursos hídricos se ven afectados por la variabilidad climatológica.

Además, los escurrimientos naturales son el proceso de mayor interés del ciclo hidrológico, porque no solo contribuyen a la recarga de presas y cuerpos de agua, también favorecen la erosión hídrica generada por precipitación que cae sobre el suelo desnudo y/o por acción hidráulica (Duque y Escobar, 2002) que arranca y desplaza sedimentos, nutrientes y otros contaminantes, hasta la desembocadura.

El escurrimiento en subcuencas hidrográficas puede estudiarse a partir de modelos de relación lluvia-escurrimiento mediante mediciones de precipitación (métodos empíricos como la fórmula racional) y/o escurrimiento (mediante aforos o ecuaciones empíricas como Chezy, Darcy-Weisbach y Manning) que se establecen para pronosticar y estimar la distribución del volumen de escurrimiento resultante de una precipitación en función del tiempo (Aparicio, 1992; Breña y Jacobo, 2006).

1.1 Antecedentes

Los lagos de Montebello conforman un complejo sistema lacustre de origen cárstico; forman parte de la cuenca del Río Grande de Comitán y se ubican al sureste de Chiapas. Debido a su riqueza biológica e importancia como sistema regulador del clima regional, vaso regulador y captador de agua, fue decretado como área natural protegida en la categoría de “parque nacional” el 16 de

diciembre de 1959 (Ávila, 2019; CONANP-SEMARNAT, 2007) y reconocido como humedal de importancia internacional, el 27 de noviembre de 2003 por la convención de Ramsar (2003).

A pesar de su importancia ecológica, cultural y económica, la región se ha visto amenazada por el cambio de uso de suelo, incendios forestales, introducción de especies exóticas, presión sobre el recurso hídrico como consecuencia del uso doméstico y riego agrícola, contaminación de agua y suelo por desechos sólidos, actividades agropecuarias y aguas residuales domésticas (Ávila, 2019; CONANP-SEMARNAT, 2007).

Desde 2003, la población local reportó a las autoridades ambientales un cambio en la calidad del agua en los lagos Tepancoapan, Balantetik, Bosque azul y la Encantada, el cual se vio reflejado en el cambio de coloración del agua, olores fétidos y mortandad de peces. Ante la situación, se plantearon inicialmente dos estudios para conocer el origen de la contaminación, el primero realizado por CFE en 2011 y el segundo financiado por el fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua Conagua-Conacyt decide en 2012 apoyar el proyecto “Estudio Hidrológico y de Calidad de Agua del Sistema Lagunar Montebello”, impulsado por un grupo de investigadores de diferentes disciplinas e instituciones (Ávila, 2019).

Posteriormente, diversas investigaciones se enfocaron en estudiar los factores que afectan directamente la calidad de agua del sistema lacustre de Montebello. Como resultado de los estudios previos realizados en la cuenca Río Grande de Comitán se identificó al cambio de uso de suelo y vegetación para la expansión de la actividad agrícola como fuente potencial de contaminación de mayor impacto en la región (Alvarado, 2015; Ávila, 2019).

Si bien el cambio de uso de suelo es un factor que favorece la llegada de los sedimentos y contaminantes al agua, las variables biofísicas del medio también juegan un papel importante, ya que definen los mecanismos que contribuye al arrastre, transporte y redistribución de sedimentos y contaminantes a lo largo de la cuenca.

En este contexto, se han llevado a cabo investigaciones que se han enfocado en el estudio geomorfológico de la cuenca (Durán, 2013; Mora *et al.*, 2016), la caracterización de los suelos (Martínez, 2015) como medio de transporte de contaminantes, la descarga de sedimentos a los lagos (Alvarado, 2017) y el análisis hidrogeoquímico (Juárez, 2014; Olea, 2015; Mota, 2019) enfocado en la presencia de contaminantes en el agua superficial y subterránea.

Con respecto a la variabilidad temporal de los recursos hídricos en la cuenca, destaca la investigación realizada por Salguero (2018) quien analizó la relación entre el agua subterránea y el caudal del río Grande de Comitán, el estudio morfológico (Alcocer *et al.*, 2016; Santillán, 2018) del sistema lacustre de Montebello, y el aporte del flujo subterráneo al lago San José (Téllez, 2022).

1.2 Justificación

En los últimos años, la demanda de agua ha incrementado debido al rápido crecimiento de la población y el desarrollo de las actividades humanas. Entre las actividades más importantes se tienen los cambios de uso de suelo y vegetación que producen efectos considerables en los

regímenes hidrológicos, por ejemplo, la deforestación incide directamente en crecidas máximas más pronunciadas y a una mayor erosión del suelo, en cambio, las prácticas agrarias y la urbanización alteran el grado de infiltración y recarga del agua subterránea. En muchas regiones del mundo, la contaminación de los recursos hídricos ha reducido la cantidad de agua potable salubre (OMM, 2011).

El estudio de la dinámica hidrológica permite conocer la cantidad del agua disponible que existe en una cuenca hidrológica, permitiendo gestionar de manera adecuada los recursos hídricos, prevenir posibles escenarios de reducción y/o escasez de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas.

En México, existen cuencas no aforadas y pobremente aforadas, que no cuentan con información hidrométrica amplia, es decir, se tienen periodos cortos de tiempo o periodos largos con información poco disponible o intermitente (Fernández, 2011). Debido a la escasa disponibilidad de información y medición de caudales, se han desarrollado metodologías para realizar la estimación indirecta de los caudales en una cuenca a partir de la precipitación, dicha variable es más sencilla de medir con registros más extensos.

La cuenca Río Grande de Comitán, ubicada al sureste del estado de Chiapas, en México, contiene una abundancia de recursos naturales que benefician el desarrollo de la población. Al sur de la cuenca se ubica el sistema lacustre de Montebello de origen kárstico que presenta variaciones en forma, tamaño y tonalidad de agua. En las últimas décadas, el sistema hídrico ha soportado múltiples presiones socioeconómicas, que han modificado la calidad físico-química del agua (CONANP-SEMARNAT, 2007).

La zona adyacente al Parque Nacional Lagunas de Montebello se caracteriza por presentar una escasa disponibilidad de datos pluviométricos y mediciones de caudal. Los únicos estudios de monitoreo de agua superficial a escala espacial local, es decir, en el sistema lacustre de Montebello, se enfocaron principalmente en la calidad del agua y fueron realizados por CFE (2012) y Olea (2015), aunque esta última investigación se enfocó más en la interacción río-acuífero.

Por lo tanto, el presente trabajo aborda el estudio de la relación lluvia-escurrimiento en la dinámica de los flujos superficiales y subterráneos a partir de un balance hidrológico y de los métodos área-velocidad y racional, con la finalidad de conocer de manera inmediata las épocas de mayor escurrimiento. La información generada es un primer elemento de diagnóstico que permite comprender la variación temporal de los recursos hídricos en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, además de contribuir al establecimiento de estrategias que mejoren la gestión de los recursos de la región.

1.3 Hipótesis

La estimación de la precipitación, a partir de producto satelital, permiten ampliar y mejorar la información en una cuenca no monitoreada o con información poco disponible.

El método racional es un modelo que utiliza variables hidrológicas y meteorológicas que permiten estimar los cambios en el escurrimiento superficial a escala subcuenca.

1.4 Objetivos

Objetivo General

Estimar y determinar el momento de mayor escurrimiento a los lagos de Montebello para un período de nueve meses (de octubre 2014 a junio 2015) mediante un modelo de lluvia-escurrimiento, como herramienta de comprensión del funcionamiento y gestión del sistema lacustre en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie.

Objetivos Particulares

Estimar la variabilidad temporal de la precipitación a partir del producto satelital CHIRPS y la estación meteorológica Lagunas de Montebello.

Identificar las variables biofísicas (morfología, clima, geología, usos de suelo y vegetación) de la subcuenca que favorecen el escurrimiento natural que descarga al sistema lacustre de Montebello.

Estimar la cantidad de agua que circula superficialmente en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, proveniente de la precipitación e identificar el período con mayor escurrimiento hacia los lagos.

Inferir la cantidad de agua subterránea a partir de un balance hidrológico a escala subcuenca.

Estimar el caudal en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, en función de la precipitación, coeficiente de escurrimiento y cobertura vegetal, para obtener un modelo de lluvia-escurrimiento, empleando el método racional.

Comparar los caudales obtenidos por el método área-velocidad y racional para identificar el modelo lluvia-escurrimiento que mejor describe la variabilidad temporal del escurrimiento superficial.

2. Marco teórico

2.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial e hidrológica, delimitada por un parteaguas (parte más alta de las montañas, laderas y colinas), donde los escurrimientos superficiales convergen en una corriente principal, la cual desemboca en un punto de salida de la cuenca, el cual puede ser un lago o el mar (Cotler Ávalos *et al.*, 2013; Gaspari *et al.*, 2013).

Ordoñez (2011) propone una clasificación de cuencas hidrográficas de acuerdo con el sistema de drenaje y su conducción final:

Endorreica o cerrada: desemboca en un lago, laguna, presa o salares, que no tiene comunicación fluvial con el mar.

Exorreicas o abierta: desemboca en un sistema mayor de drenaje como el mar o en el océano.

Criptorréicas: que fluye subterráneamente debido a los suelos calcáreos que permiten la infiltración casi inmediata de la lluvia.

Arreica: las aguas se pierden por evaporación o infiltración en el terreno antes de encauzar a una red de drenaje.

La cuenca hidrográfica interconecta todo el espacio geográfico que la constituye. Su estudio permite diagnosticar, evaluar y planificar el uso de agua, suelo, vegetación y fauna; por consiguiente, es la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos. Para su estudio, planificación y manejo, las cuencas hidrográficas pueden subdividirse en varias unidades hidrológicas de menor tamaño denominadas subcuencas y éstas a su vez en microcuencas, las cuales drenan sus aguas en la corriente principal de la subcuenca (Gaspari *et al.*, 2013).

De esta manera se puede decir que la cuenca hidrográfica es un sistema integral definido por el relieve terrestre. La cuenca está conformada por las interrelaciones de diversos subsistemas biofísicos (atmósfera, clima, suelo, subsuelo, hidrología, flora y fauna), sociales (tenencia de tierras, calidad de vida, educación, cultura, política, leyes, etc.) económicos (sistemas de producción, infraestructura, servicios, tecnología) demográficos (tamaño y distribución de la población), que determinan el funcionamiento de una cuenca (Ordoñez, 2011) y su capacidad productiva.

Para cualquier toma de decisión relacionada con el aprovechamiento del sistema se requiere un conocimiento profundo de las variables biofísicas involucradas. En el estudio de cuencas hidrográficas, las principales variables biofísicas son precipitación, hidrología, tipo de suelo y sus diferentes usos (Figura 2.1). Las variables anteriores permiten entender la dinámica del ciclo hidrológico dentro de la cuenca, ya que, al ser un espacio colector, distribuidor y regulador de agua, evidencia los efectos de distintas actividades humanas; por lo tanto, es posible cuantificar e

identificar los impactos negativos o positivos de dichas actividades, las cuales influyen directamente en calidad y cantidad de agua a lo largo de la red hidrográfica.

Actualmente, el agua es uno de los recursos más importantes y limitados para los seres vivos. En los últimos años, se ha observado una disminución de los reservorios de agua y el aumento en los problemas de calidad del agua, además de su importancia para desarrollar actividades productivas, han aumentado el interés colectivo por estudiar la distribución y variación temporal a escala cuenca hidrográfica, regional y nacional.

Existen diferentes métodos para analizar y cuantificar cada uno de los procesos que interviene en el ciclo hidrológico, sin embargo, el método más utilizado para la cuantificación y estudio de los recursos hídricos a través de la precipitación, escurrimiento superficial, escurrimiento subterráneo y evaporación, es el balance hidrológico. En este estudio se considera a la cuenca hidrográfica como un sistema que presenta variaciones de flujo, con entradas y salidas que modifican la cantidad de agua disponible para uso humano.

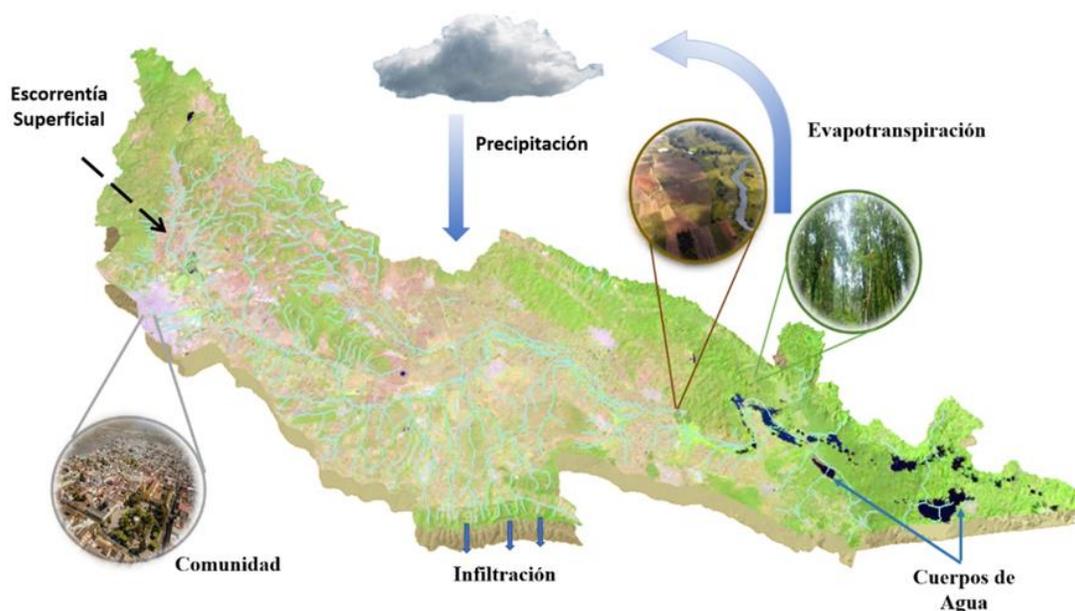


Figura 2.1 Principales variables biofísicas de una cuenca hidrográfica.

2.2 Balance hidrológico superficial

El balance hidrológico es un análisis de los componentes del ciclo hidrológico, que se basa en el principio de conservación de masas o ecuación de continuidad. Establece que, para cualquier volumen arbitrario y para cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y las salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Sokolov y Chapman, 1974).

La ecuación de balance hidrológico para cualquier cuenca natural está representada por la siguiente ecuación:

$$P + Q_{SUP} + I - ETR - Q_{SUB} - \Delta V = 0 \quad (1)$$

Donde: P = precipitación

Q_{SUP} = Escorrentía superficial

I = Infiltración

ETR = Evapotranspiración real

Q_{SUB} = salida de escorrentía superficial de la cuenca

ΔV = volumen total de agua almacenada en la cuenca

La ecuación es simple, sin embargo, la cuantificación de sus variables es normalmente difícil por la falta de mediciones directas para estimar cada una de ellas, también por su variación espacial y temporal.

2.3 Precipitación

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico, es producto de la condensación del vapor de agua en nubes de las que puede caer en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo. Presenta variaciones en cantidad, tiempo y espacio debido a factores atmosféricos y al relieve terrestre. Por ello, es fundamental dar seguimiento mediante series cronológicas de mediciones constantes en el tiempo y a largo plazo para poder realizar análisis hidrológicos cuantitativos de variabilidad (Dinku *et al.*, 2018) que permitan pronosticar precipitaciones extremas o sequías y validación de modelos hidrológicos (Dingman, 2015).

Las precipitaciones extremas son uno de los principales factores que desencadena los procesos de erosión, también favorecen el arrastre de compuestos en suspensión y en solución hacia los cuerpos de agua.

2.3.1 Medición de la precipitación

Las mediciones puntuales de precipitación se registran en términos de la altura de lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros, 1 mm de precipitación equivale a un litro de agua por metro cuadrado. Los instrumentos de medición comúnmente usados son pluviómetros y pluviógrafos. Dichos instrumentos registran lecturas cada 12 o 24 horas de forma manual o automática (Aparicio, 1992).

2.3.2 Estaciones meteorológicas

Las mediciones de precipitación y otras variables de importancia climatológica son registradas por estaciones meteorológicas terrestres. Los datos son precisos al registrar lo que está sucediendo en las inmediaciones de la estación y, por consiguiente, son la principal fuente de información para el estudio de datos climáticos.

A pesar de su importancia, las estaciones meteorológicas requieren de un registro constante de mediciones, un amplio espacio que genera un enorme costo en instalación y mantenimiento. Además, las estaciones se encuentran escasamente distribuidas en países de América Latina. La mayoría de las estaciones se ubican en ciudades, en algunos aeropuertos y pueblos. Sin embargo, las áreas rurales o áreas de conservación no presentan registros meteorológicos o poseen

información incompleta, por lo tanto, en estas zonas a menudo requieren utilizar la interpolación entre estaciones cercanas (Dinku *et al.*, 2018; IRI, 2015; Mendelsohn *et al.*, 2007).

Dichos factores limitan el estudio del comportamiento climatológico y en los últimos años la opción más viable ha sido el uso de información satelital.

2.3.3 Base de datos para el análisis de precipitación mediante teledetección satelital

Las técnicas de teledetección satelital brindan información continua y a escala global de los procesos que suceden en el sistema tierra-atmósfera.

En teledetección se utilizan sensores pasivos (miden la radiación solar reflejada o emitida por los objetos) y activos (miden la radiación generada por los sensores y reflejada por los objetos). Los sensores pasivos incluyen sensores multiespectrales, espectrómetro, radiómetro de microondas, sensores fotográficos, etc., en cambio, los sensores activos más usados son lidar, sonda y radar (Chuvienco, 1995). Dependiendo del tipo de sensor y de las características del objeto varía el rango de frecuencia de la radiación medida a partir de la cual se estima la temperatura, precipitación, vapor de agua, entre otras variables meteorológicas.

Usualmente, los sensores se colocan en satélites artificiales para medir precipitación y proporcionan información con alta resolución espacial y temporal a escala global, no obstante, al no tomar en cuenta la pérdida por evaporación se produce un sesgo en las mediciones. También pueden generarse sesgos debido al muestreo diurno, la afinación del instrumento de medición o porque el algoritmo de precipitación no considera algunas de las propiedades atmosféricas o superficiales y, por lo tanto, no puede interpretarlas correctamente (Boushaki *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2006).

Existe una variedad de productos derivados de observaciones satelitales para consultar y descargar datos de precipitación a nivel mundial. Entre los productos se encuentra Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS V2.0).

CHIRPS V2.0 es una base de datos creada por Climate Hazards Center (CHC) de la University of California, Santa Barbara (UCSB) en colaboración con la U.S. Geological Survey (USGS), National Aeronautics and Space Administration (NASA) y National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). CHIRPS se extiende entre las latitudes 50° N y 50° S y en todas las longitudes con una resolución espacial de 0.05° (aproximadamente 5 km). Las estimaciones temporales son diarias, pentadales y mensuales de 1981 a casi el presente, de libre acceso (Funk *et al.*, 2015).

El producto CHIRPS estima la precipitación a partir de: (1) CHPclim (Climate Hazards group Precipitation climatology), 2) datos de observaciones en infrarrojo (IR) de satélites geoestacionarios administrados por la NOAA, además de observaciones en infrarrojo del Centro Climático de Predicción (CPC) y del Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) de los Estados Unidos, 3) Análisis de precipitación TMPA 3B42 (Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis) y 4) mediciones *in situ* de precipitación obtenidas de servicios meteorológicos estadounidenses y agencias meteorológicas nacionales de México, América Central, América del Sur y África (Funk *et al.*, 2015, IRI, 2015).

El producto CHIRPS es una excelente opción en zonas con escasa información, además de generar series temporales históricas que permiten identificar, analizar y pronosticar sequías y monitorear cambios recientes en la precipitación (IRI, 2015).

2.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la pérdida de agua del suelo, lago y superficies vegetales a la atmósfera a través de la vaporización de agua líquida (Irmak, 2008). Dicha variable considera dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración.

La evaporación es un fenómeno físico que involucra el movimiento de agua a la atmósfera desde fuentes como el suelo, de la lluvia interceptada por las copas de los árboles y hojas de las plantas y de las superficies de cuerpos de agua, mientras que la transpiración consiste en la pérdida de agua en forma de moléculas de vapor que pasan a través de los estomas de las hojas (Katul y Novick, 2009).

2.4.1 Evapotranspiración potencial

Thornthwaite definió a la ETP como: “la cantidad de agua que se perderá en una superficie cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas”.

La evapotranspiración potencial (ETP) se puede estimar a partir de métodos que utilizan ecuaciones empíricas como por ejemplo el método de Thornthwaite. Este método estima la evapotranspiración potencial mensual y anual de una cuenca a partir de las variables climatológicas: temperatura media y radiación solar estimada con base en el número de días y horas de luz para un determinado período de tiempo. La ecuación se define como:

$$ETP = 1.6 K_a \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (2)$$

El índice de calor anual se calcula a partir de la siguiente fórmula

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (3)$$

donde

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad (4)$$

Y a su vez el parámetro “a” se calcula a partir de:

$$a = (6.75 \times 10^{-7}) * I^3 - (7.71 \times 10^{-5}) * I^2 + (1.79 \times 10^{-2}) * I + 0.49239 \quad (5)$$

Donde: ETP = evapotranspiración potencial sin corregir (mm/mes)

T_j = temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

I = índice de calor anual, el cual a partir de las temperaturas medias de los 12 meses

j = número de mes

a = parámetro dependiente de I

K_a = constante que depende de la latitud y el mes del año

Las horas de sol de acuerdo con el mes y la latitud se estiman a partir de una tabla teórica publicada en Aparicio (1992), la tabla se adjunta en la sección de Anexo III.

2.4.2 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real (ETR) es la que realmente se evapora del suelo y se transpira por las plantas, bajo condiciones atmosféricas, de suelo y de vegetación existentes. Se estima a partir de la evapotranspiración potencial y la precipitación con base en el agua que se pierde conforme pasa el tiempo hasta agotar la reserva hídrica del suelo para cubrir las necesidades del sistema (Toro-Guerrero *et al.*, 2014).

La ETR se cuantifica mediante el balance hídrico, método empírico propuesto por Thornthwaite que calcula mensualmente los siguientes parámetros:

Se estima la precipitación útil como:

$$P - ETP \quad (6)$$

Si $P > ETP$ entonces $ETR = ETP$, por lo tanto, la precipitación cubre la demanda de evaporación y reserva hídrica del suelo (R), los meses se clasifican como húmedos.

- Entonces, la R se estima mediante la ecuación (7), se suma la reserva del mes anterior al mes que se estima.

$$R = R_{i-1} + (P - ETP) \quad (7)$$

- Se produce un exceso de agua cuando la reserva máxima se ha excedido y se produce el escurrimiento superficial.

$$Exceso = P - (ETP + R) \quad (8)$$

Pero, si $P < ETP$ entonces el agua que se evapora es igual a:

$$ETR = P + |R_i - R_{i-1}| = P + |\Delta R| \quad (9)$$

- La suma de P y R debe ser igual a la ETP , pero si no se iguala entonces se produce un déficit hídrico en el suelo.

$$Déficit = P + \Delta R \quad (10)$$

Para determinar a R se considera la cobertura vegetal predominante y la capacidad de retención de agua del suelo.

2.5 Escorrentía

La escorrentía o escurrimiento, es un proceso que forma parte del ciclo del agua; se define como el agua proveniente de la precipitación (que no se evaporó o transpiró) que circula sobre o bajo la superficie del terreno, llegando a alimentar a las corrientes de agua superficiales (ríos) hasta llegar a un cuerpo de agua (Aparicio, 1992). Existen diferentes tipos de escurrimiento:

Escorrentía superficial: es agua que escurre sobre la superficie del terreno por acción de la gravedad hacia los ríos y/o lagos durante y después de la caída de lluvia. En su trayectoria siguen ocurriendo procesos de infiltración y evaporación (Springall R.,1970). La escorrentía superficial ocurre cuando la capa superficial del suelo satura o cuando la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración, además es la escorrentía más rápida (Dingman, 2015).

Escorrentía subsuperficial: es agua de lluvia que se infiltra en el suelo y se mueve cerca de la superficie del terreno de forma subhorizontal, hacia una corriente superficial (arroyo o manantial). Este tipo de escurrimiento puede ser rápido o lento, dependiendo de las características de los estratos del suelo (Aparicio, 1992; Springall R.,1970).

Escorrentía subterránea: es la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático, y posteriormente circular hasta descargar en una red de drenaje. Este tipo de escorrentía es la más lenta (Aparicio, 1992).

2.5.1 Método área-velocidad media para medición de caudales

Los ríos, los arroyos y las corrientes de agua se consideran canales naturales abiertos cuya agua fluye a superficie libre por acción de la gravedad. Estos canales naturales proveen de agua a diversas actividades económicas, principalmente irrigación.

Existen diferentes métodos para medir y monitorear espacial y temporalmente los caudales naturales, sin embargo, en este trabajo se utiliza el método de área - velocidad. El método se basa en la forma simplificada de la ecuación de la continuidad y se expresa a partir de la velocidad del caudal que pasa a través del área de una sección transversal. La ecuación es la siguiente (Camargo y Franco, n.d.; Ramos, 2000):

$$Q = V * A \quad (11)$$

Donde: Q = caudal en m^3/s ,

V = velocidad media del flujo en m/s

A = área transversal de la sección en m^2

2.5.2 Secciones de aforo para medición de caudal

Para determinar el caudal mediante el método área-velocidad media, se establecen lugares estratégicos conocidos como secciones de aforo o de control ubicadas en una sección transversal del cauce. Sin embargo, las secciones de aforo natural se caracterizan por presentar áreas variables dependiendo de los meses del año, los procesos de erosión y sedimentación. Por lo tanto, es

necesario elegir un sitio de aforo que corresponda a un tramo recto del río sin cambios en la sección transversal (Pedroza, 2017).

En el sitio de aforo, el área y velocidad se pueden determinar al dividir la sección transversal de la corriente en segmentos prismáticos (Figura 2.2). De acuerdo con Kennedy *et al.* (1992), el ancho de los segmentos dependerá del ancho de la corriente (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Ancho de los segmentos en función del ancho de la corriente.

Ancho de la corriente (m)	Ancho de la franja (m)
Hasta 1.2	0.2 - 0.3
1.2 – 5	0.3 – 0.5
5 – 10	0.5 - 1.0
10 – 50	1.0 – 5.0
60 – 100	5.0- 10.0
Más de 100	10.0 – 20.0

Fuente: Manual de Aforos, Kennedy *et al.* (1992).

En cada segmento se determina la velocidad media y el área debido a que no son uniformes. A partir de los parámetros anteriores se estima el caudal total. La ecuación (11) se expresa de la siguiente forma (Kennedy *et al.*, 1992):

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n A_i V_i \quad (12)$$

Donde: Q = Caudal total (m³/s)

A_i = área asociada a cada segmento i (m²)

V_i = velocidad media asociada a cada segmento i (m/s)

q_i = caudal en el segmento i (m³/s)

i = número de segmentos (1,2,3, ..., n)

El área de cada sección se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A_i = \frac{d_1 + d_2}{2} * L_1 + \dots + \frac{d_i + d_{i-1}}{2} * L_i \quad (13)$$

$$A_T = \sum_{i=1}^n A_i \quad (14)$$

Donde:

d_1, d_2 = profundidad vertical del flujo (m)

L_i = ancho asociado a cada segmento i (m)

A_T = área total del cauce (m²)

Otros parámetros de importancia son:

$$Pm = 2d_{m\acute{a}x} + \sum_{i=1}^n L_i \quad (15)$$

$$Rh = \frac{A}{Pm} \quad (16)$$

Donde: Pm = perímetro de mojado (m)

$d_{m\acute{a}x}$ = profundidad máxima (m)

Rh = radio hidráulico (m)

Usualmente, se determina el área mediante sondeos y la velocidad del agua se mide a partir de métodos directos (se realizan con molinete, químicos y flotadores) e indirectos (se emplean vertederos y curvas de caudal). Para la medición de la velocidad media de un cauce natural influyen diversos factores como: las características de la sección transversal, viscosidad, rozamiento y tensión superficial (Kennedy *et al.*, 1992).

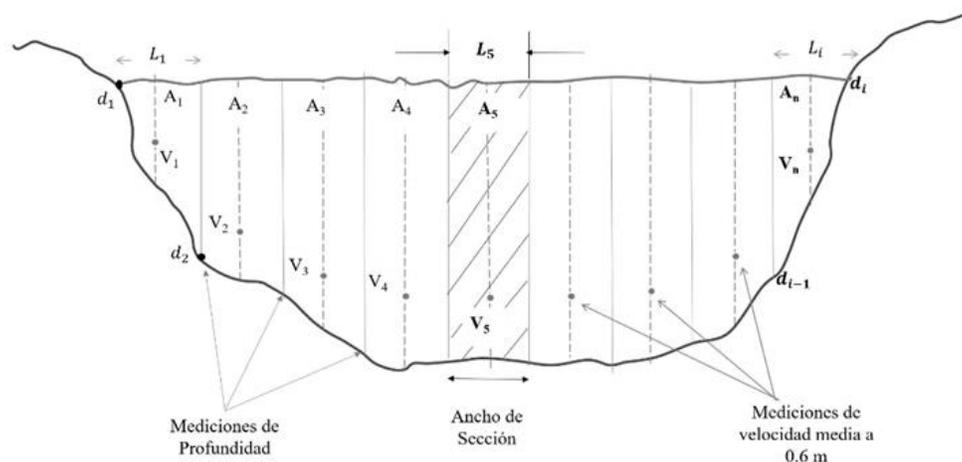


Figura 2.2 División del ancho del cauce en secciones.

2.5.3 Ecuación de Manning

La fórmula empírica de Manning es frecuentemente utilizada para estimar la velocidad media en caudales naturales. La ecuación está dada por (Camargo y Franco, n.d.):

$$V = \frac{1}{\eta} R_H^{2/3} S^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Donde: V = velocidad de escurrimiento en (m/s)

η = coeficiente de Manning o de rugosidad (adimensional)

R_H = radio hidráulico en (m)

S = Pendiente hidráulica (m/m)

El coeficiente de Manning es muy variable y depende de varios factores como la rugosidad de la superficie, la vegetación, sedimentación y erosión, tamaño, forma, nivel y caudal del canal, etc.; que deben ser considerados para seleccionar el valor adecuado de η (Pastora F., 2010).

2.5.4 Sensores de presión para medición de caudales

En un fluido en movimiento, la presión puede medirse mediante sensores. Estos instrumentos se caracterizan por ser compactos, de fácil manejo que además integran un *datalogger* (Braithwaite, 2008) y se emplean principalmente en zonas de difícil acceso.

Los sensores de presión sumergibles, también conocidos como limnómetros o piezómetros, son transductores que emplean sensores con membrana sensible que puede detectar los cambios de presión en la columna de agua. Su funcionamiento se basa en el principio del equilibrio hidrostático, el cual se cumple aun cuando el agua fluye (Tamari y Aguilar-Chávez, 2010).

2.5.5 Modelo método racional para determinar la escorrentía superficial

El Método Racional es un modelo indirecto - empírico que se usa para determinar la escorrentía superficial de una cuenca a partir de la relación lluvia-escurrimiento. Este método se basa en el estudio de la precipitación (duración, intensidad, magnitud) y las características fisiográficas de la cuenca de estudio.

El método asume que la escorrentía es proporcional a la precipitación, además supone que la precipitación es constante y uniforme en la cuenca durante un largo tiempo. Al inicio, el caudal que sale del sistema aumenta con el tiempo, pero en algún momento se alcanza el punto de equilibrio, es decir, que el volumen por unidad de tiempo que entra será el mismo que sale (Aparicio, 1992). La fórmula del método Racional es:

$$Q = \frac{Ce * I * A}{360} \quad (18)$$

Q = caudal máximo de escorrentía (m³/s)

Ce= coeficiente de escurrimiento que es adimensional

i = intensidad (mm/h)

A= área de la cuenca (ha)

360 = factor de conversión de unidades

Sin embargo, el método racional no considera la infiltración, las variaciones temporales y espaciales de la precipitación, aportaciones de caudal provenientes de cuencas vecinas o trasvases, por afloramiento de cauces internos o producto de la hidrogeológica de la región.

De acuerdo con la ecuación (18) una de las variables a estimar es el coeficiente de escurrimiento (Ce). Esta variable depende de diversos factores como el tipo de suelo, cobertura vegetal, humedad del suelo y a la magnitud de los eventos de precipitación. Una forma de estimar su valor es a partir de la ecuación propuesta por la NOM-011-CONAGUA-2015 en el Apéndice Normativo "A". La ecuación está en función del uso de suelo y del volumen de precipitación.

$$Si K \leq 0.15 \quad Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} \quad (19)$$

$$\text{Si } K > 0.15 \quad C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5} \quad (20)$$

Donde: C_e = Coeficiente de escorrentía
 K = parámetro en función del uso de suelo y vegetación
 P = Precipitación anual o mensual en mm

El valor de K se obtiene a partir de las ecuaciones anteriores y con base en la información de uso de suelo y vegetación en la subcuenca de estudio, la ecuación se expresa como:

$$K = \frac{\sum(k_i * A_i)}{A_T} \quad (21)$$

Donde: K = parámetro en función del uso de suelo y vegetación (adimensional)
 k_i = factor para cada tipo de uso de suelo y vegetación (adimensional)
 A_i = área total de la cuenca (ha)
 A_T = área correspondiente a los diferentes tipos de suelo y vegetación dentro de la cuenca (ha)

La K se estima a partir de los valores definidos por la NOM-011-CONAGUA-2015 de acuerdo con la clasificación de suelos (arenas permeables, arenas semipermeables y arcillas) de la subcuenca de estudio y con respecto al uso actual y cobertura del suelo (tipos de cultivo, lagunar y tular, pastizal, bosque y zonas urbanas).

Otra variable del método es la intensidad de precipitación (I), que se obtiene a partir de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F). Las curvas I-D-F son utilizadas para cuantificar la magnitud de los eventos de precipitación y para representar gráficamente las características de una tormenta. Para un sitio de interés, se obtienen a partir de series históricas de precipitación extrema para determinadas duraciones (Campos y Gómez, 1990).

El procedimiento general de obtención de curvas I-D-F consiste en:

Se seleccionan las precipitaciones máximas diarias en 24 horas a escala anual registradas en estaciones meteorológicas ubicadas en la subcuenca o cerca de ella.

A partir de las series de precipitación máxima anual se obtienen las series de intensidad máxima para diferentes duraciones, usualmente se calcula para 30, 60, 120 o 360 minutos. Se utiliza la siguiente conversión:

$$i = \frac{p(mm)}{d(min)} * \frac{60 min}{1 h} \quad (22)$$

Después se estima el número de años en que se presenta el evento que se define como período de retorno (T) y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (23)$$

Posteriormente, se ajustan los valores de precipitación por medio de una función de distribución de probabilidad teórica con la finalidad de representar la probabilidad de ocurrencia de un episodio de precipitación. Existen diversas funciones, pero la distribución de Gumbel es una de las más

utilizadas. La función de Gumbel determina la probabilidad de que se presente el mismo evento de precipitación, se ha demostrado teóricamente que se ajusta mejor a los valores máximos. La función de distribución de probabilidad de Gumbel es la siguiente:

$$F(x) = e^{\left[-e^{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)}\right]} \quad (24)$$

Donde: $F(x)$ = probabilidad de que se presente un valor igual o menor a x
 e = base del logaritmo neperiano
 x = variable aleatoria

Para conocer la precipitación que se producirá en cada n años se despeja x de la ecuación (24), obteniendo:

$$\frac{(x - \beta)}{\alpha} = -\ln(-\ln(F(x)))$$

$$x = -\ln(-\ln(F(x))) * \alpha + \beta \quad (25)$$

Los parámetros α y β , se obtienen a partir de las ecuaciones (26) y ecuación (27)

$$\beta = \bar{x} + 0.5772 * \alpha \quad (26)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6}} * s \quad (27)$$

Donde: \bar{x} = media de la población
 s = desviación estándar de la población

Una vez realizado el ajuste de probabilidad, se obtiene la ecuación generalizada para calcular las curvas I-D-F para cada período de retorno en función de la duración e intensidad del episodio de precipitación. La ecuación propuesta por Aparicio (1992) es:

$$i = \frac{k T^m}{(d+c)^n} \quad (28)$$

Donde: k , m , n y c son constantes que se calculan mediante un análisis logarítmico:

$$\text{Log } i = \log k + m \log T - n \log (d + c) \quad (29)$$

Que también se puede expresar como:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (30)$$

Donde:

$$y = \text{Log } i, \quad a_0 = \log k, \quad a_1 = m, \quad x_1 = \log T, \quad a_2 = -n, \quad x_2 = \log(d + c)$$

Los datos de intensidad, duración y frecuencia obtenidos usualmente se agrupan en torno a líneas rectas, pero, a veces, resultan ligeramente curvas, lo cual se puede corregir agregando un valor constante c . Al haber un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos, se obtiene un sistema de ecuaciones (31) que se resuelve por mínimos cuadrados (Aparicio, 1992).

$$\left. \begin{aligned} \sum y &= Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1)^2 + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2)^2 \end{aligned} \right\} (31)$$

Donde N = número de datos

3. Descripción del área de estudio

3.1 Localización

El área de estudio se ubica dentro de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, que a su vez forma parte de la cuenca Río Grande de Comitán, localizada al sur-sureste del estado de Chiapas. Las coordenadas geográficas son $92^{\circ} 10' 0''$ y $91^{\circ} 40' 0''$ longitud oeste y $16^{\circ} 27' 30''$ y $16^{\circ} 06' 40''$ latitud norte. La cuenca tiene una extensión de 810.43 km^2 y comprende los municipios de Comitán de Domínguez, la Trinitaria, las Margaritas y la Independencia (CONAGUA, 2009). Al sur de la cuenca se encuentra el área natural protegida “Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM)”, reconocida internacionalmente como sitio Ramsar desde 2003 (Figura 3.1).

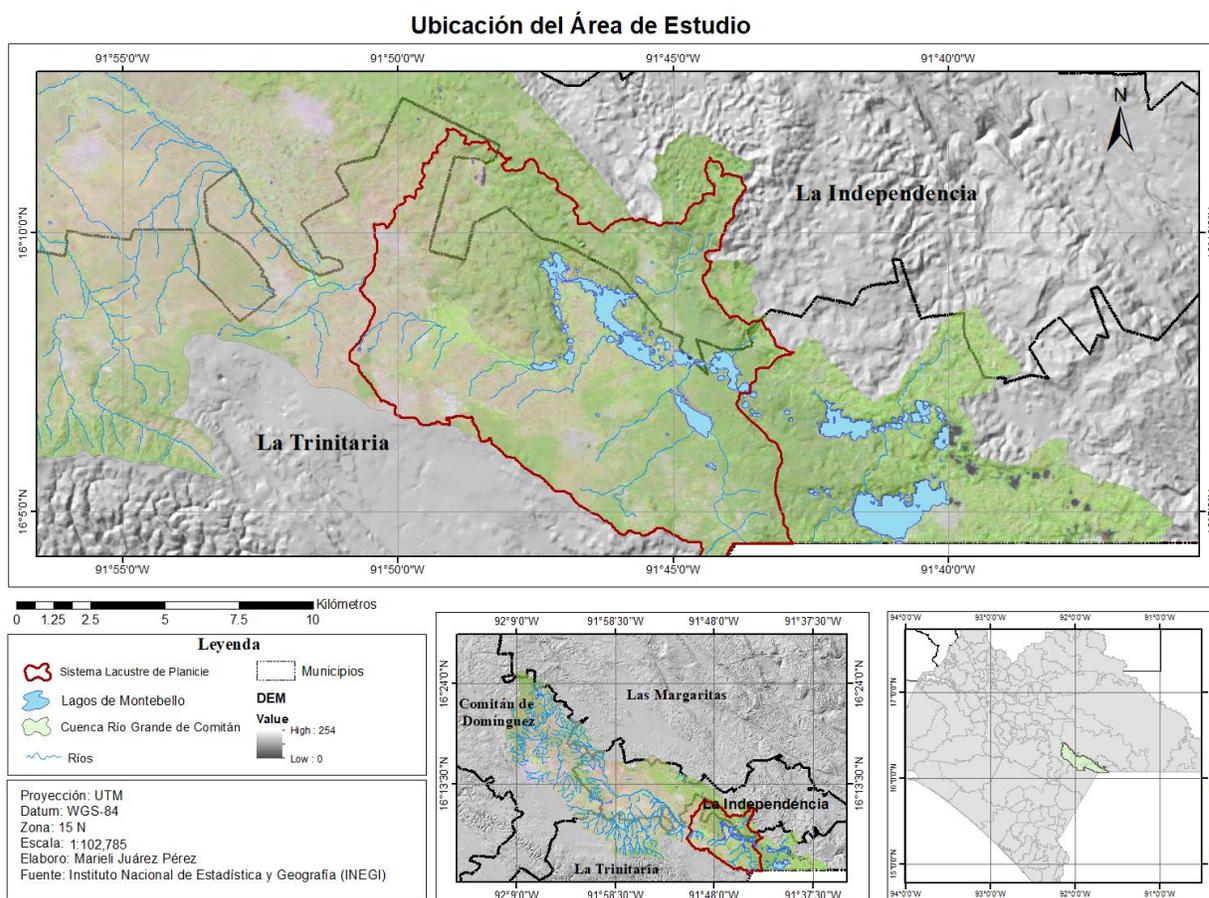


Figura 3.1 Ubicación de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, México.

Fuente: Elaboración propia a partir de Alvarado (2015); Alvarado *et al.* (2022).

3.2 Clima

De acuerdo con el ajuste de clasificación climática de Köppen realizado por García (2004) en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie predomina el clima templado subhúmedo con lluvias

abundantes en verano (Cw) y cálido húmedo con lluvias en verano (Aw). Los climas que se presentan se deben a la presencia de elevaciones montañosas.

En el área de estudio predominan dos tipos de clima: semicálido húmedo y templado subhúmedo con respecto al mapa presentado por Bahena (2014) elaborado con datos de INEGI a escala 1:250 000 (Figura 3.2).

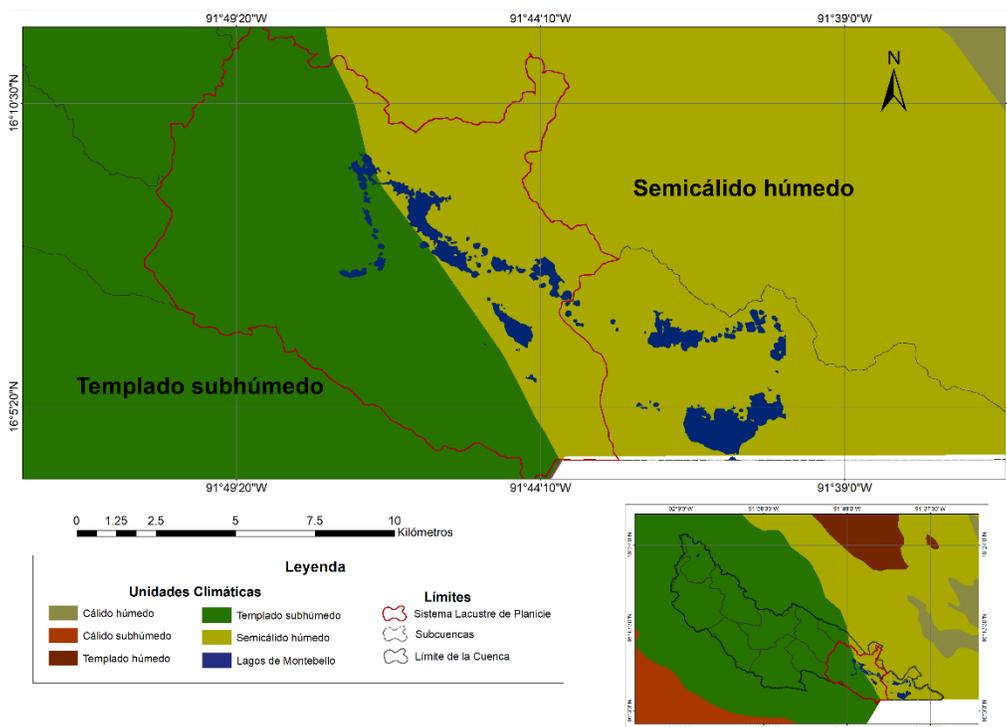


Figura 3.2 Unidades Climáticas de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, México. Fuente: Modificado de Bahena (2014) y elaborado a partir de Alvarado (2015); Alvarado *et al.* (2022).

3.2.1 Temperatura

La Comisión Federal de Electricidad (2012) realizó un análisis de temperatura y precipitación en un conjunto de estaciones climatológicas ubicadas en la zona de Montebello. El informe reportó temperatura media anual de 17.5 °C (Figura 3.3). La temperatura varía de acuerdo con la altitud y a los diferentes períodos del año. Se consideran los meses de marzo a octubre como los más calurosos del año y durante estos meses la temperatura media es de 29.3 °C, mientras que los meses de diciembre a enero se consideran como los más fríos. En general, la temperatura máxima disminuye de occidente a oriente, en cambio, la temperatura mínima disminuye de oriente a occidente.

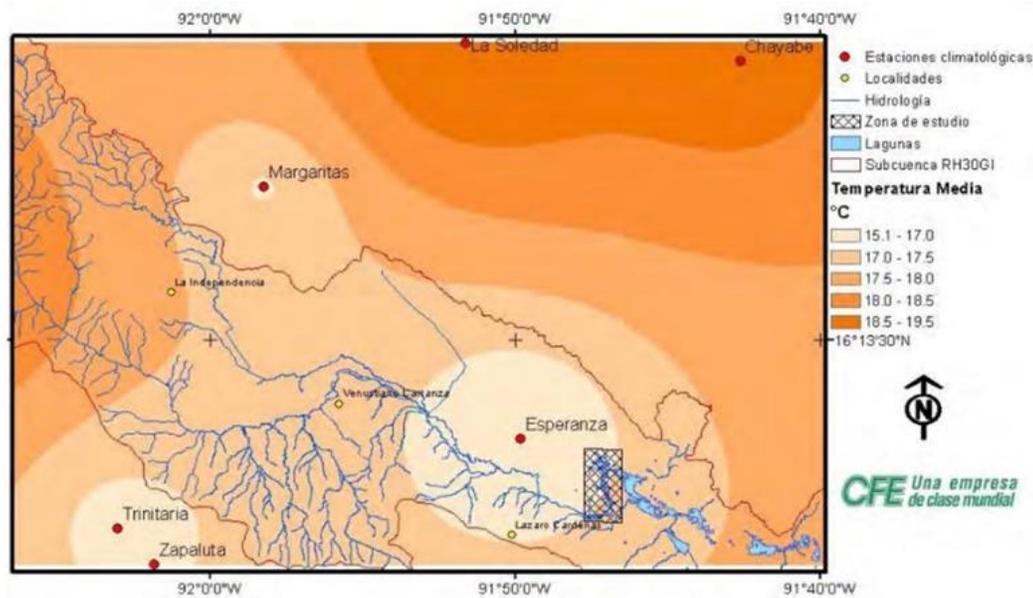


Figura 3.3 Temperatura media de estaciones meteorológicas analizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Fuente: CFE (2012).

3.2.2 Precipitación

La precipitación anual promedio es de 1,862 mm y se han identificado dos periodos, uno de alta humedad (de abril a noviembre) llueve en promedio 1,716 mm, y otro de relativa sequía (de noviembre a abril) que registra 146 mm. El mes de septiembre es considerado el más húmedo. (Ávila, 2019; CONANP-SEMARNAT, 2007).

Por otro lado, la CFE (2012), reporta una precipitación media anual en el conjunto de estaciones de 1482.6 mm, la cual presenta variaciones en su distribución (Figura 3.4), debido a que se registran los máximos valores de precipitación al norte de los lagos de Montebello y disminuye hacia el occidente de la región. Los meses con mayor precipitación son de junio a septiembre, siendo este último mes el más lluvioso.

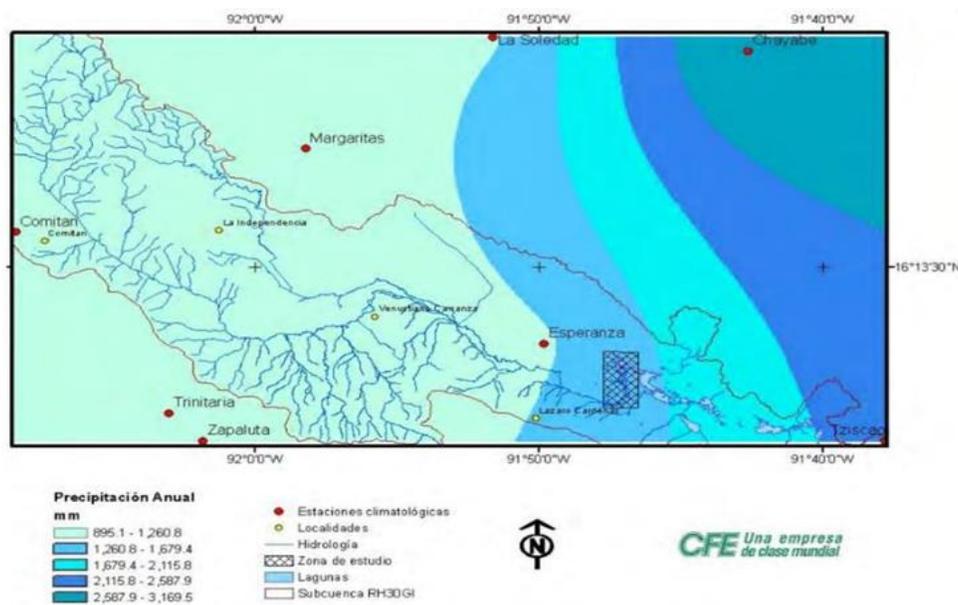


Figura 3.4 Precipitación media de estaciones climatológicas analizadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Fuente: CFE (2012).

3.3 Hidrología

El área de estudio forma parte de la cuenca Río Grande de Comitán, la cual a su vez está comprendida en la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva – Usumacinta, la cual se divide en tres subregiones: Medio Grijalva, Alto Grijalva y Bajo Grijalva-Sierra. La región hidrológica se encuentra conformada por seis cuencas principales (Grijalva-Villahermosa, Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, Grijalva-La Concordia, Tonalá, Lacantún, Chixoy y Usumacinta) y por 81 subcuenca (CONAGUA, 2014). Al sur del área de interés se localiza el sistema lacustre Lagunas de Montebello, en la subregión Alto Grijalva dentro de la cuenca Lacantún

El cauce principal del área de estudio es el Río Grande de Comitán, el cual fluye de noroeste a suroeste. El río nace como desagüe de la laguna Juznajab ubicada al norte del municipio de Comitán de Domínguez (CONAGUA, 2009). El Río Grande es alimentado por corrientes intermitentes en la época de lluvias y durante su trayecto fluye a través de tierras agrícolas y zonas urbanas hasta su desembocadura en el sistema lacustre de Montebello (CONANP-SEMARNAT, 2007).

Los lagos de Montebello forman parte de un sistema lacustre de origen kárstico, conformado por más de cincuenta lagos con extensión en México y Guatemala, los cuales varían en forma, tamaño y tonalidad de agua (Mora *et al.*, 2016). El sistema lacustre es alimentado principalmente por agua subterránea. Los lagos actualmente forman parte del Parque Nacional Lagunas de Montebello, decretado el 16 de diciembre de 1959, por su importancia ecológica es reconocido como una Región Terrestre prioritaria y considerado sitio Ramsar desde 2003 (CONANP-SEMARNAT, 2007).

El sistema lacustre Tepancoapan es el más grande de Montebello con 13 km de longitud, reúne a los lagos San Lorenzo, Bosque Azul y Yalguech, estos se comunican durante la época de lluvias por la inundación de sus áreas colindantes. El sistema drena parcialmente en un arroyo que se alimenta de las aguas de San Lorenzo y Bosque Azul (Figura 3.5), a través de un sumidero ubicado en el sitio conocido como El Arco (González del Castillo, 2003).

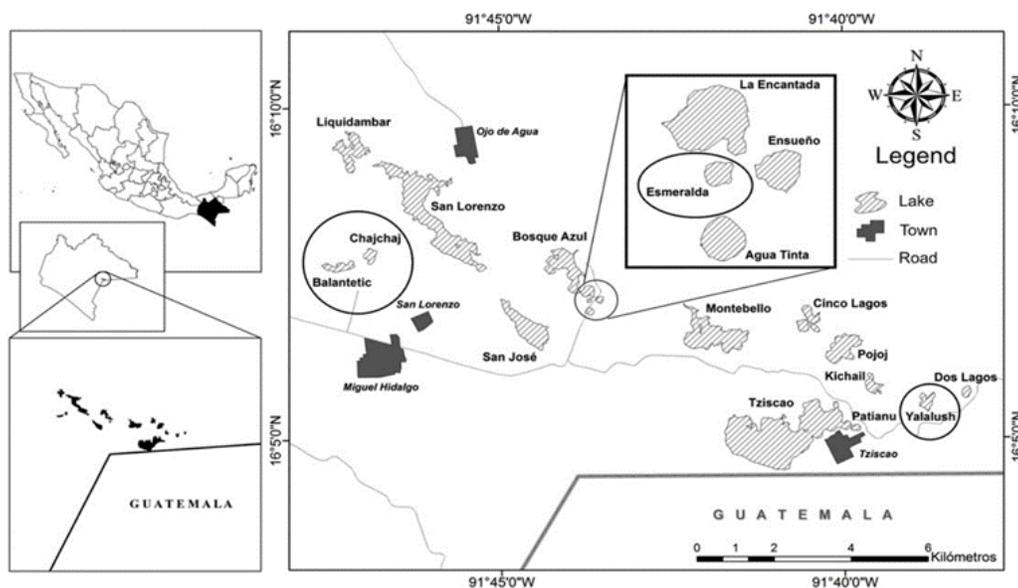


Figura 3.5 Ubicación del sistema lacustre: Parque Nacional Lagunas de Montebello. Fuente: Alcocer *et al.* (2016).

3.4 Geología y geomorfología

La cuenca Río Grande de Comitán es kárstica y está conformada por secuencias sedimentarias de origen marino y transnacional (Mora *et al.* 2016), por lo que en la región afloran rocas calizas bien estratificadas y dispuestas en forma de bancos, capas y lajas. Las calizas ligeramente plegadas de la zona se caracterizan por la litificación de las rocas en zonas lábiles (fracturas, poros, impurezas, etc.). El proceso de karstificación está acompañado de materiales residuales en las calizas, sobre todo arcillosos y junto con un porcentaje de arenas (CONANP-SEMARNAT, 2007).

El área se ubica dentro de la provincia tectónica de Fallas de Transcurrencia del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas (Ortega-Gutiérrez *et al.* 1992), cuya tectónica se encuentra estrechamente relacionada con la interacción entre las placas de Cocos, Norteamérica y el Caribe (Guzmán-Speziale y Meneses-Rocha, 2000). La zona ha estado sujeta a diversos procesos geológicos como son la sedimentación, plegamiento y fallamiento (Arellano y Jiménez, 2012; Padilla y Sánchez, 2007).

De acuerdo con Durán (2013), las planicies aluviales cubren una superficie de 36.7 km² y presentan una geometría tabular con pendientes máximas de 12°, por lo tanto, se clasifican como superficies semiplanas a planas. El sistema lacustre de Montebello se desarrolla sobre rocas calizas y

dolomitas del Cretácico. Con respecto al sistema de fallas y fracturas reportadas, tienen una orientación NW-SE y E-W, además tienen una estrecha relación con los cuerpos de agua ubicados al NW (Figura 3.6).

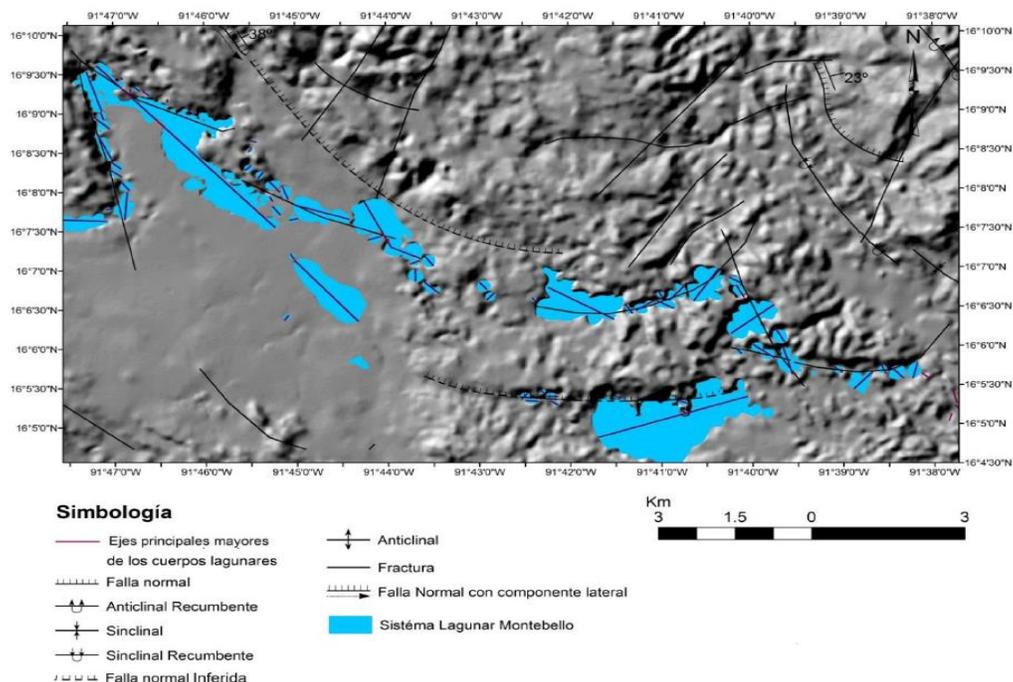


Figura 3.6 Rasgos geológicos del sistema lacustre de Montebello, Chiapas, México. Fuente: Durán (2013).

Mora *et al.* (2016) describió 13 unidades geomorfológicas, asociadas a diferentes litologías (calizas, dolomías, lutitas, conglomerados polimícticos y yeso) y agrupadas en morfologías de montaña, lomerío y planicie. Sin embargo, Durán en 2013 identificó cinco unidades litológicas: aluvión, caliza, caliza-dolomita, lutita-arenisca, caliza-lutita, a partir de la carta geológica de INEGI escala 1:250 000. Además, describió 17 unidades geomorfológicas agrupadas en endógeno estructural plegado, exógeno acumulativo, exógeno denudativo fluvio-kárstico y exógeno denudativo kárstico.

3.5 Uso de suelo y vegetación

La comunidad vegetal más importante es el bosque de coníferas y el parque cuenta con una riqueza de 208 especies leñosas. La especie más abundante es *Pinus oocarpa*, localizada en el centro y noreste del Parque. En 2005, la superficie forestal del Parque se estimó en 4,707 ha, sin embargo, 44% de esta superficie correspondía a bosques perturbados o con vegetación secundaria. Por otro lado, 578 ha habían sido transformadas en terrenos agrícolas (CONANP-SEMARNAT, 2007).

De acuerdo con CONAGUA (2009), las principales asociaciones vegetales presentes en la cuenca Río Grande de Comitán son: bosques de coníferas, bosque mesófilo de montaña, bosques deciduos,

pastizal cultivado, vegetación secundaria, pastizales y herbazales, sin embargo, la agricultura de temporal es la actividad económica que cubre la mayor parte del área de estudio

En la cuenca media se desarrolla la agricultura de temporal de cultivos de maíz y frijol para el autoconsumo y hortalizas, pero también se cultiva de manera intensiva una variedad híbrida de jitomate, principalmente en los ejidos Emiliano Zapata, Venustiano Carranza, El Triunfo, El Porvenir y Lázaro Cárdenas. Con respecto a los ejidos ubicados en la cuenca baja (Ojo de Agua, Antelá, Miguel Hidalgo y Tzisco), se llevan a cabo actividades agrícolas de autoconsumo e intensivas de maíz, frijol, tomate, jitomate y hortalizas, en las zonas adyacentes a los lagos de Tepancuapan y San Lorenzo pertenecientes al complejo lagunar de Montebello (Ávila, 2019). Los agricultores aplican fertilizantes nitrogenados, sulfatados y fosfatados para mejorar la producción de las cosechas.

4. Metodología

4.1 Recopilación de información

1. Para identificar las morfologías del paisaje en el área de los lagos que influyen en el escurrimiento superficial, se realizó un análisis de las variables con información detallada acerca de:
 - Se adquirió el continuo de elevaciones mexicano (CEM) correspondiente al estado de Chiapas, con resolución de celda de 15 m.
 - Se adquirieron dos imágenes satelitales Landsat 8 con clave LC08_L1TP_021049_20141027_20170303_01_T1 y LO08_L1TP_021049_20150304_20170227_01_T1, resolución de celda de 30 m del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).
 - Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación a escala 1:250,000 de INEGI, Serie VI.
 - Conjunto de datos vectoriales de la carta red hidrográfica a escala 1:50 000, edición 2.0, subcuenca hidrográfica RH30GI.
 - Se adquirió el mapa de subcuencas elaborado por Alvarado (*et al.* 2022, 2015).
 - Se recopiló información meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y CONAGUA sobre la zona de estudio.

4.2 Balance hidrológico a escala subcuenca

Las variables consideradas en el balance hidrológico se basaron en la ecuación (1) y se consideran los siguientes criterios:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

Donde, Entradas = Precipitación local y escurrimiento superficial que entra al sistema lacustre

Salidas = Escurrimiento superficial que sale del sistema + evapotranspiración real + variaciones en el almacenamiento de agua en los lagos + escurrimiento subterráneo.

4.3 Precipitación

4.3.1 Selección de datos

Para la selección de las estaciones meteorológicas se consideró su ubicación y la cantidad de datos disponibles. Las estaciones debían situarse cerca y dentro del límite de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Con base en dichas condiciones, se recopilaron series de precipitación diaria correspondientes al período de estudio comprendido entre enero 2014 a diciembre 2015.

Tabla 4.1 Estación meteorológica ubicada dentro de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas, México.

Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Cuenca	Municipio
Lagunas de Montebello	16.1145833	-91.730056	1492	R. Grande de Comitán	La Trinitaria

Fuente: Elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

4.3.2 Procesamiento de datos

Se realiza un análisis comparativo inicial de los datos de precipitación diaria de la estación meteorológica (punto) con los datos de CHIRPS (píxel) a partir de un análisis estadístico (máximos mínimos y número de días con precipitación) y descriptivo con gráficas (series de tiempo). A partir de la comparación se observa que los datos CHIRPS subestiman la precipitación a lo largo del año, sin embargo, el número total de días con precipitación es menor al número de días con precipitación registrados por la estación (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Comparación de precipitación diaria (mm) estimada por CHIRPS con respecto a la estación meteorológica Lagunas de Montebello.

Estación de Monitoreo	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	No. días con precipitación (mm)		
			2014	2015	Total
Lagunas de Montebello	0.2	77.4	242	215	457
CHIRPS	0.5	55.2	100	95	195

Posteriormente, se realizó un ajuste a la base de datos de precipitación CHIRPS aplicando la metodología propuesta por Robles-Morua *et al.* (2012) a escala diaria y mensual a partir de la información obtenida de los registros de precipitación diaria y mensual de la estación meteorológica Lagunas de Montebello de CONAGUA. Finalmente, se evalúa la precipitación ajustada de CHIRPS diaria, mensual y estacional en la zona de estudio.

a) CHIRPS ajustado a escala diaria

Para poder realizar el ajuste de los datos de CHIRPS, se relacionan los datos de precipitación in situ (estación meteorológica) con los datos de píxel (CHIRPS) a escala diaria. Posteriormente, se seleccionan únicamente los días con registro de precipitación en ambas series de datos.

Una vez seleccionados los datos, se corrige la precipitación CHIRPS aplicando el factor multiplicativo de la relación de medias (RM) promediada de Steiner *et al.* (1999). Los factores de corrección de sesgo se evaluaron a escala diaria a partir de los pares compuestos por precipitación observada (medición in situ) – satélite (píxel). El RM se calcula diariamente (j) para el período de estudio a partir de la ecuación propuesta por Robles-Morua *et al.* (2012):

$$RM(j) = \frac{\sum_{i=1}^N g_i(j)}{\sum_{i=1}^N p_i(j)} \quad (32)$$

Donde: $RM(j)$ =razón promediada del factor multiplicativo

N = número total de pluviómetros

i = píxeles correspondientes

$g_i(j)$ y $p_i(j)$ = son los valores correspondientes a lluvia diaria medida in situ y el valor del píxel respectivamente.

Después, se calculó el sesgo de campo medio (B) de Bedient et al. (2013). El B se utilizó como indicador de ajuste de las estimaciones de precipitación de CHIRPS. Aquí B se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{g_i} \quad (33)$$

Donde: B = sesgo de campo promedio

p = precipitación medida in situ

g = lluvia estimada por CHIRPS

i = la estación climatológica

N = número total de pluviómetros

Con base en el sesgo de campo estimado se realiza el ajuste para cada dato de precipitación estimado con CHIRPS, es decir, CHIRPS ajustado se estimó a partir de la aplicación de los factores multiplicativos diarios $RM(j)$ y B a los datos de precipitación de CHIRPS.

b) CHIRPS ajustado a escala mensual

Es importante mencionar que los pasos descritos para el ajuste de datos CHIRPS diarios también se aplicaron a los datos de CHIRPS mensuales. Los datos CHIRPS a escala mensual se estimaron a partir de la sumatoria mensual de los datos diarios de precipitación.

4.3.3 Validación de datos

Se validan los datos estimados a escala diaria y mensual de CHIRPS ajustado con respecto a los datos registrados por la estación meteorológica a partir de los siguientes parámetros estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson (r), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \bar{Q}obs_i) (Qsim_i - \bar{Q}sim_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \bar{Q}obs_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Qsim_i - \bar{Q}sim_i)^2}} \quad (34)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qsim_i - Qobs_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - \bar{Q})^2} \quad (35)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Qobs_i - Qsim_i)^2}{N}} \quad (36)$$

Donde: $Qobs_i$ = precipitación observada

$Qsim_i$ = precipitación satelital ajustada

N = número total de precipitaciones observadas

4.4 Evapotranspiración potencial y real

Por la falta de información meteorológica en la zona de estudio, la evapotranspiración se calcula a partir de un balance de humedad en el suelo. En un balance hídrico se utiliza la evapotranspiración potencial (ETP) como variable de referencia para estimar la evapotranspiración real (ETR), dicha variable permite cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico en el suelo.

Se calculó la ETP mensual y anual en la subcuenca de estudio a partir de los datos de temperatura media mensual registrados en enero de 2014 a diciembre de 2015 en la estación Lagunas de Montebello. Se eligió dicha estación por su ubicación y cercanía al sistema lacustre de Montebello (ver Figura 4.1). La ETP se estima a partir del método de Thornthwaite usando las ecuaciones (2-5).

A partir de la ETP mensual se estimó la evapotranspiración real (ETR) mediante un balance hídrico. El método emplea otras variables de entrada como la precipitación mensual y la reserva de agua en el suelo. Para estimar la reserva máxima de agua que puede contener los poros del suelo a un metro de profundidad, se considera la capacidad de campo del suelo (ecuaciones 6-10). Los métodos utilizados para estimar ETP y ETR se describen a detalle en la sección de Marco Teórico.

4.5 Escurrimiento superficial

4.5.1 Selección de sitios de monitoreo

Para el estudio de la dinámica de los flujos superficiales de entrada y salida de agua en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, se seleccionaron dos sitios para monitorear el cauce del río Grande de Comitán.

Para definir la salida de agua por escurrimiento superficial del sistema lacustre se elaboró un mapa hipsométrico con la finalidad de representar los cambios de altitud que influyen en la dirección de

escurrimiento del cauce natural (Figura 4.2). Además, se consideraron los sistemas de fallas y fracturas asociadas a la falla El Naranjo y Juncaná, reportadas al noroeste del Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) (Téllez, 2022).

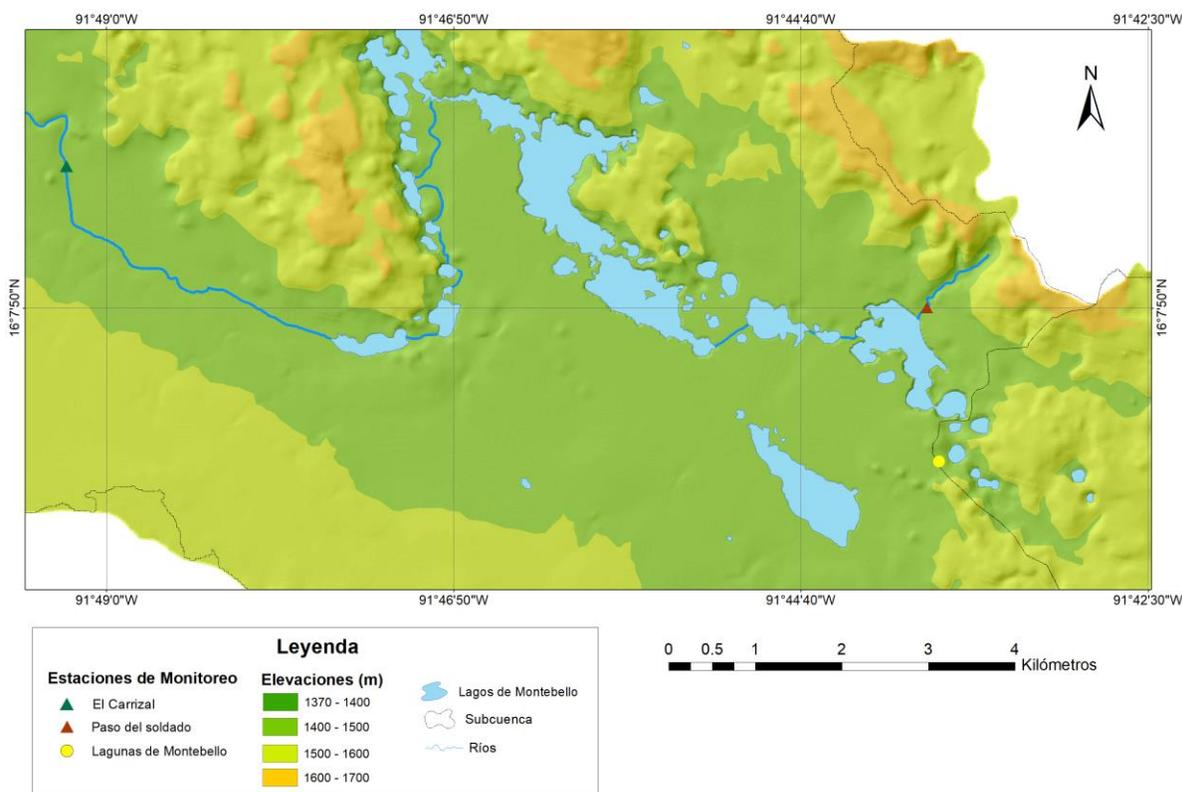


Figura 4.2 Ubicación de los sitios de monitoreo para estimar el escurrimiento superficial a lo largo del Río Grande de Comitán, en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas. Elaboración propia con datos de INEGI (2010; 2013).

De acuerdo con Durán (2013), el área se clasifica en dos unidades morfológicas: planicie y sierra. La sierra está dividida por una depresión con orientación NNE. Al noroeste del lago Bosque Azul pasa una falla (Figura 4.3) que provoca la fracturación de las rocas calizas y dolomías, causando la formación de un valle ciego -característico de los sistemas kársticos- por el que escurre un afluente hacia el este y que desaparece (Anexo III, Figura 2). Por lo tanto, se consideró al sitio de monitoreo Paso del Soldado como una salida de agua del sistema lacustre debido a las características geológicas y morfológicas de la zona.

Las estaciones de monitoreo se ubicaron al noroeste del lago Balantetic y al noreste del lago Bosque Azul, es decir, al inicio y final del sistema lacustre de Montebello, ubicado dentro de la subcuenca de estudio (Figura 4.3).

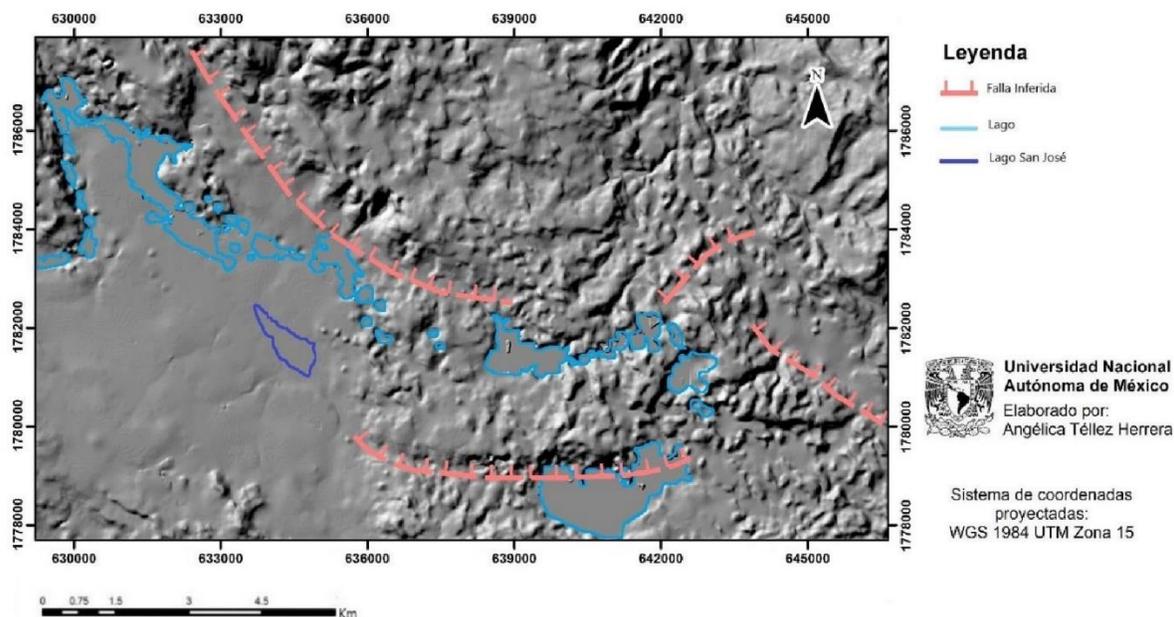


Figura 4.3 Mapa de elementos estructurales propuestos en el sistema lacustre de Montebello, Chiapas. Fuente: Elaborado por Téllez (2022) con base en los propuestos por Duran (2013).

4.5.2 Medición de caudal a partir de aforos

Se establecen dos sitios de monitoreo: El Carrizal y Paso del Soldado, ubicados en la entrada y salida de los lagos ubicados dentro de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie (la subcuenca fue delimitada por Alvarado en 2015). Se realizaron dos aforos en noviembre de 2021 y mayo de 2022 para el sitio El Carrizal y para Paso del Soldado, los aforos se realizaron en mayo de 2014, octubre de 2019 y noviembre de 2021. Los datos recolectados en campo fueron proporcionados por el Dr. Oscar Escolero y su equipo de trabajo.

Las variables medidas en campo fueron profundidad y velocidad, esta última variable se midió con un flujómetro. A partir de la información y con ayuda de las ecuaciones (12-16) se estima el área transversal (A), perímetro de mojado (P_m), radio hidráulico (R_h) y caudal del río (Q). Las mediciones se muestran en el Anexo III.

4.5.3 Monitoreo de caudales

La medición del caudal se realizó en dos sitios de monitoreo: El Carrizal (entrada) y Paso del Soldado (salida) ubicadas al sur de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. El monitoreo del caudal en ambos sitios se hizo con sensores de presión (levellogger Solinst), programados para medir cada hora. Los sensores fueron instalados a 40 cm de profundidad, colocados dentro de un cilindro metálico de 15 cm de diámetro (datos proporcionados por el Dr. Oscar Escolero).

Las mediciones de caudal para la estación El Carrizal iniciaron el 18 de octubre de 2014 y finalizaron el 28 de junio de 2015 y para la estación Paso del Soldado se realizaron dos mediciones,

la primera fue del 1 de enero de 2014 al 17 de mayo de 2014 y la segunda medición se realizó del 19 de octubre de 2014 al 21 de diciembre de 2015 (Anexo III, Figura 2).

Debido a la falta de mediciones de caudal en el sitio El Carrizal, se decidió analizar la variabilidad temporal y estacional del escurrimiento superficial en la subcuenca para un período de estudio de nueve meses (octubre de 2014 a junio de 2015).

4.5.4 Calibración de los datos de caudal

A partir de la información recabada durante los aforos hechos en ambas estaciones de monitoreo, se simulan los datos de área (A), radio hidráulico (Rh) y perímetro de mojado (P) para diferentes alturas por el método de regresión lineal. Las variables únicamente se simulan para el sitio Paso del Soldado porque para El Carrizal no se tiene información suficiente, por lo tanto, los datos se calibran a partir de los aforos efectuados en noviembre de 2021 y mayo de 2022. Con base en la información anterior se genera la curva de área contra tirante y radio hidráulico contra tirante para cada sitio de monitoreo. Las curvas y su respectiva ecuación se muestran en el Anexo III, Figura 3.

Para el estudio de las variaciones temporales del caudal que escurre en la subcuenca de interés se utiliza la curva de área obtenida en el paso anterior para estimar las variaciones temporales del área transversal del cauce. La velocidad media se calcula a partir de la fórmula empírica de Manning (17), sin embargo, es necesario determinar previamente la pendiente hidráulica del cauce en cada sitio de monitoreo. La pendiente se estima con la ecuación de Manning y los valores de rugosidad (η) reportados por Chow (1994). Los valores se muestran en el Anexo III. Finalmente, se estima el caudal medio mensual y anual que escurre en cada sitio de monitoreo a partir del método área - velocidad.

4.6 Variaciones de volumen en el sistema lacustre

Se descargaron dos imágenes Landsat 8 con la menor presencia de nubosidad de la plataforma Earth Explore, perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Con cada una de las imágenes se realizó una combinación con las bandas espectrales 5, 4 y 3 correspondientes al falso color o infrarrojo con el objetivo de identificar las masas de agua.

Para el estudio de la variación de volumen en los lagos, se seleccionaron únicamente siete de los lagos ubicados al sur de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Los lagos son: Balantetic, Bosque Azul, Chajchaj, Esmeralda, La Encantada, Liquidambar y San Lorenzo. Con ayuda del software ArcGIS se calcula el área y el perímetro en cada lago. Los datos de profundidad media se obtuvieron a partir de los valores reportados por Alcocer *et al.* (2016). Finalmente, se obtiene el volumen total de agua para octubre 2014 y marzo 2015.

4.7 Determinación del período de estudio

A partir de las variables de entrada (precipitación, escurrimiento superficial) y salida (evapotranspiración real, escurrimiento superficial y variaciones del volumen de agua) estimadas en la subcuenca, se realiza un balance hidrológico. Cabe mencionar, que el escurrimiento subterráneo no se midió en campo, la variable es inferida a partir de la ecuación del balance hidrológico propuesta en el presente trabajo (ecuación 1).

Debido a la falta de información de escurrimiento superficial y subterráneo, además de las variaciones de volumen del agua en los lagos a escala mensual, se hace un balance hidrológico de seis meses, período comprendido entre octubre de 2014 a marzo de 2015. El proceso para estimar el balance hidrológico en el sistema lacustre de Montebello se resume en los diagramas de las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

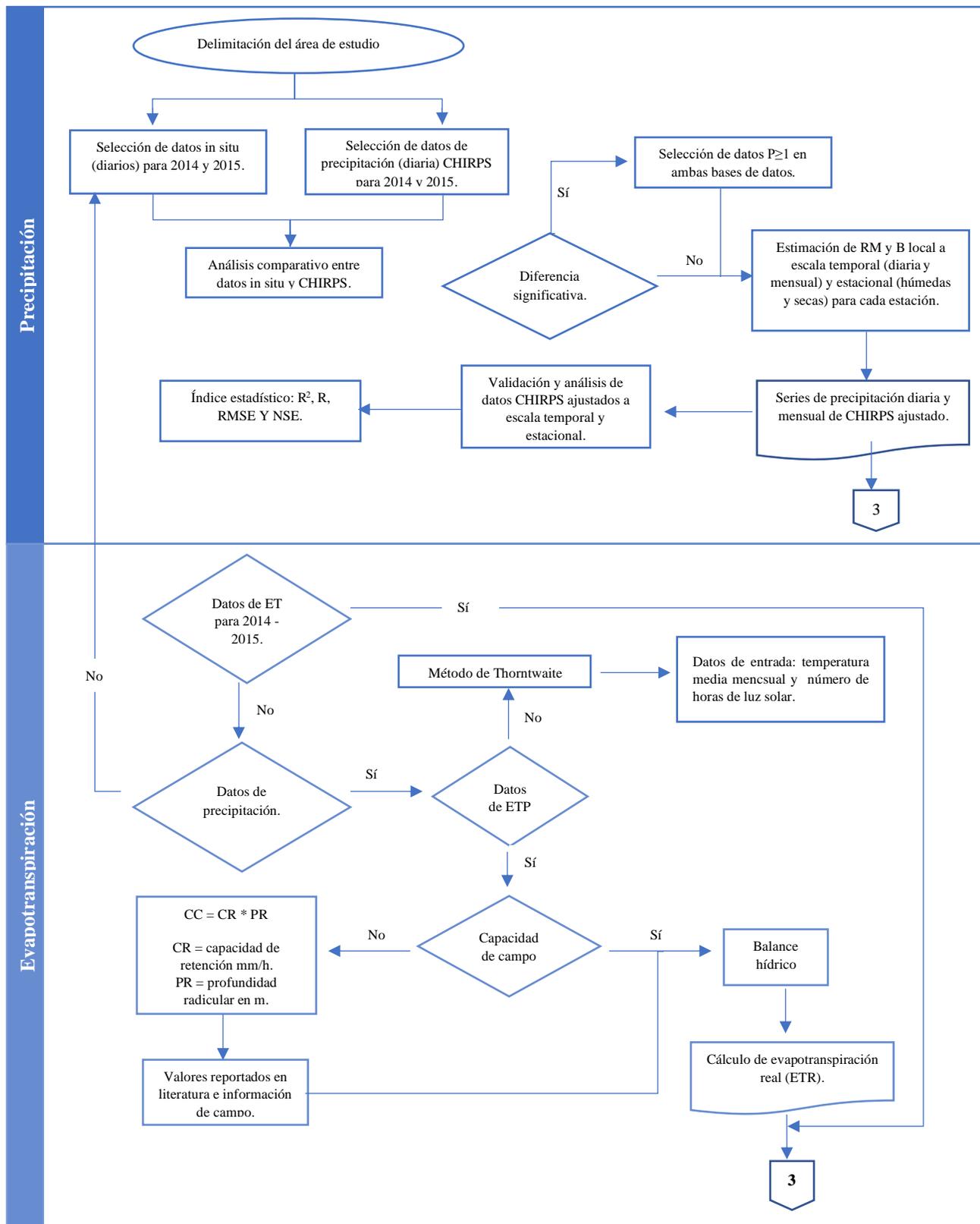


Figura 4.4 Diagrama del proceso de balance hidrológico para precipitación y evapotranspiración real.

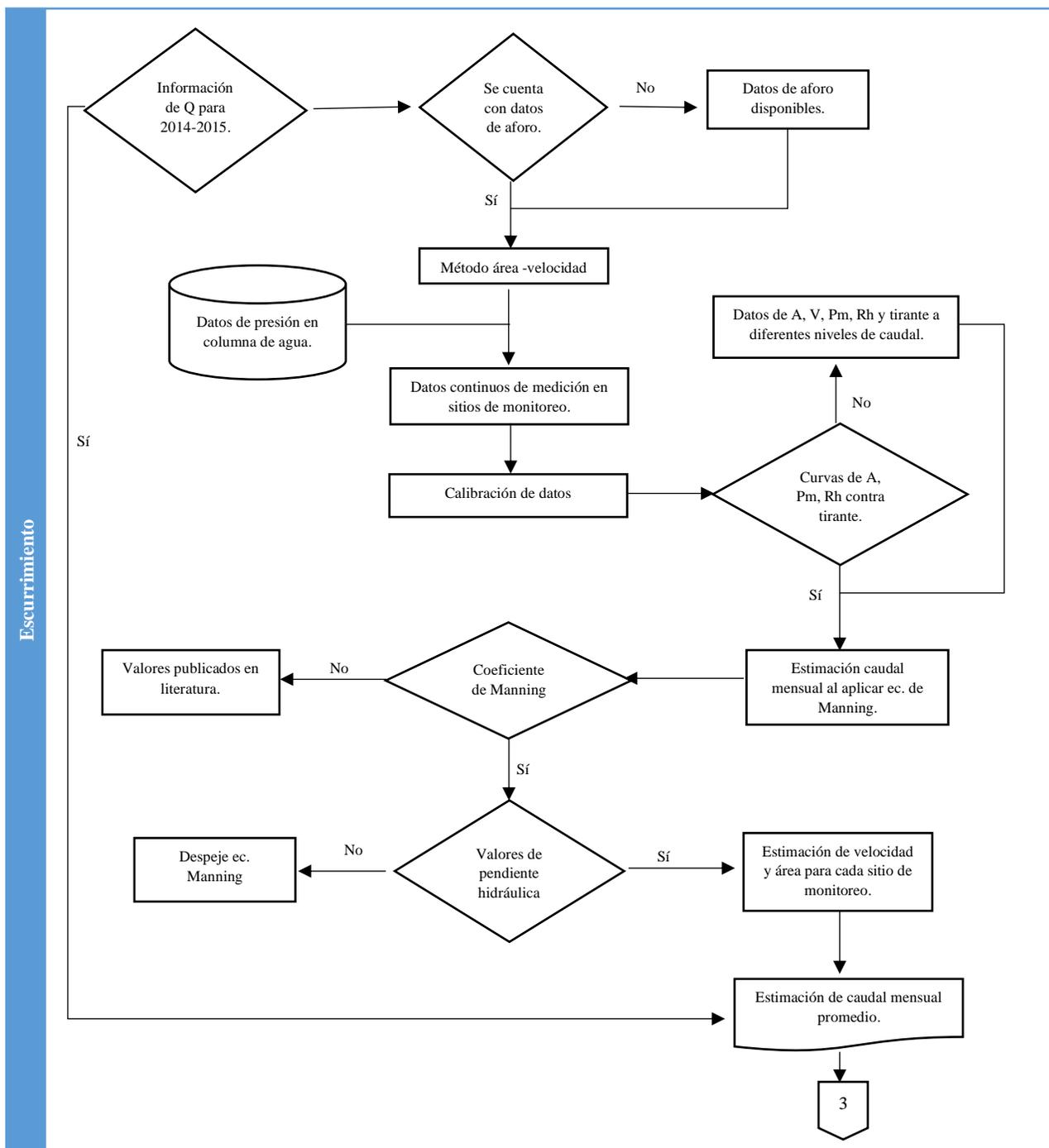


Figura 4.5 Diagrama del proceso de balance hidrológico para escurrimiento superficial.

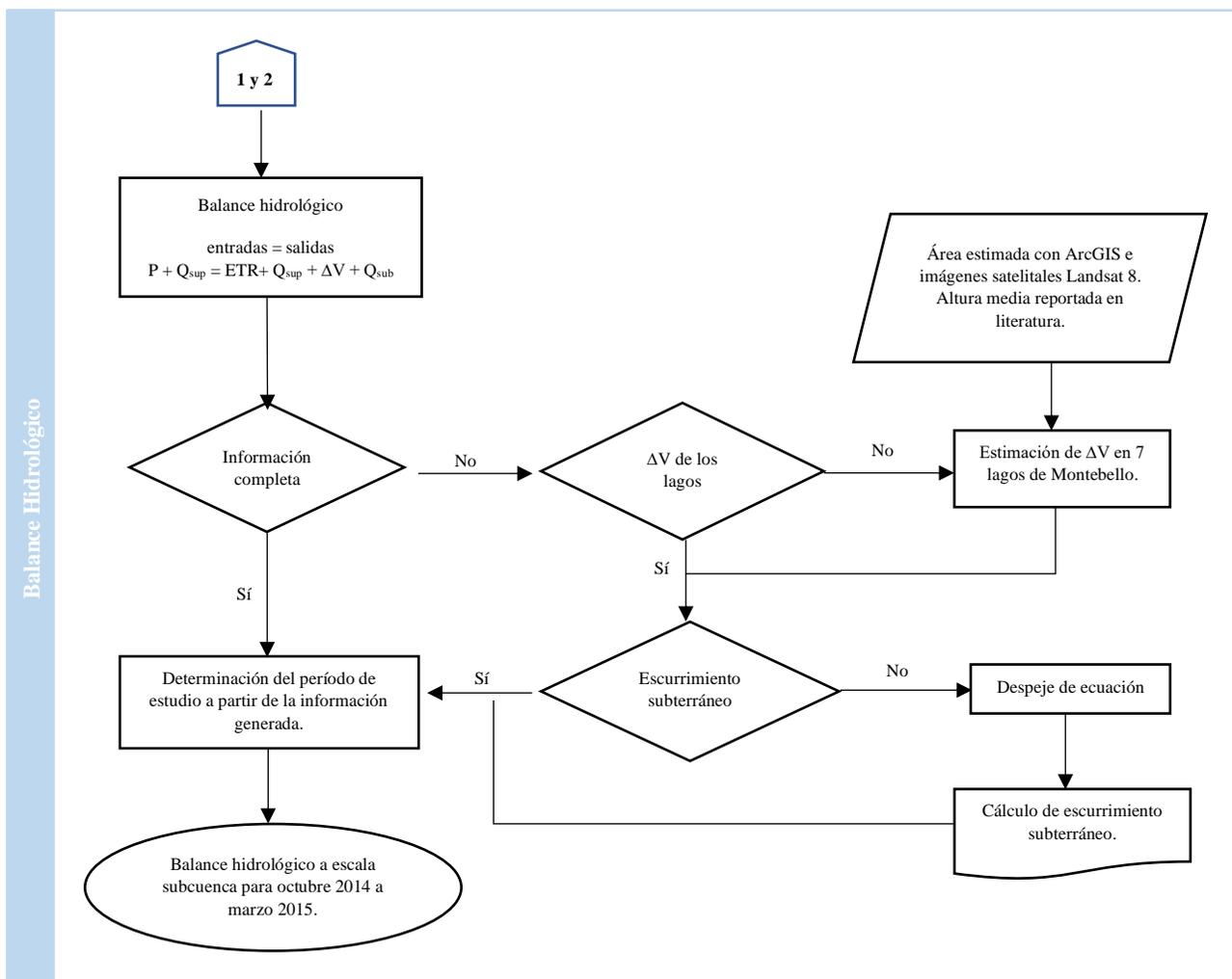


Figura 4.6 Diagrama del proceso de balance hidrológico en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie.

4.8 Estimación de caudal por método racional

La subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, se caracteriza por ser una región de difícil acceso, poco aforada y con registros cortos de datos. Por lo tanto, se plantea estimar el caudal máximo en la subcuenca a partir del método racional con la finalidad de calcular el volumen máximo de agua que escurre a escala mensual y anual en la subcuenca durante el período de estudio. En consecuencia, se compara el desempeño de los resultados obtenidos con el método área-velocidad. La simulación del modelo racional se realizó para los años 2014 y 2015.

Para la aplicación del modelo se utilizan como datos de entrada la precipitación mensual registrada en la estación meteorológica Lagunas de Montebello y la precipitación mensual del producto CHIRPS ajustado, uso de suelo y vegetación. Para la delimitación de la cuenca se usa el mapa de subcuencas publicado por Alvarado (2015; *et al.* 2022) con la finalidad de extraer el área correspondiente a la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie (ver Figura 4.7).

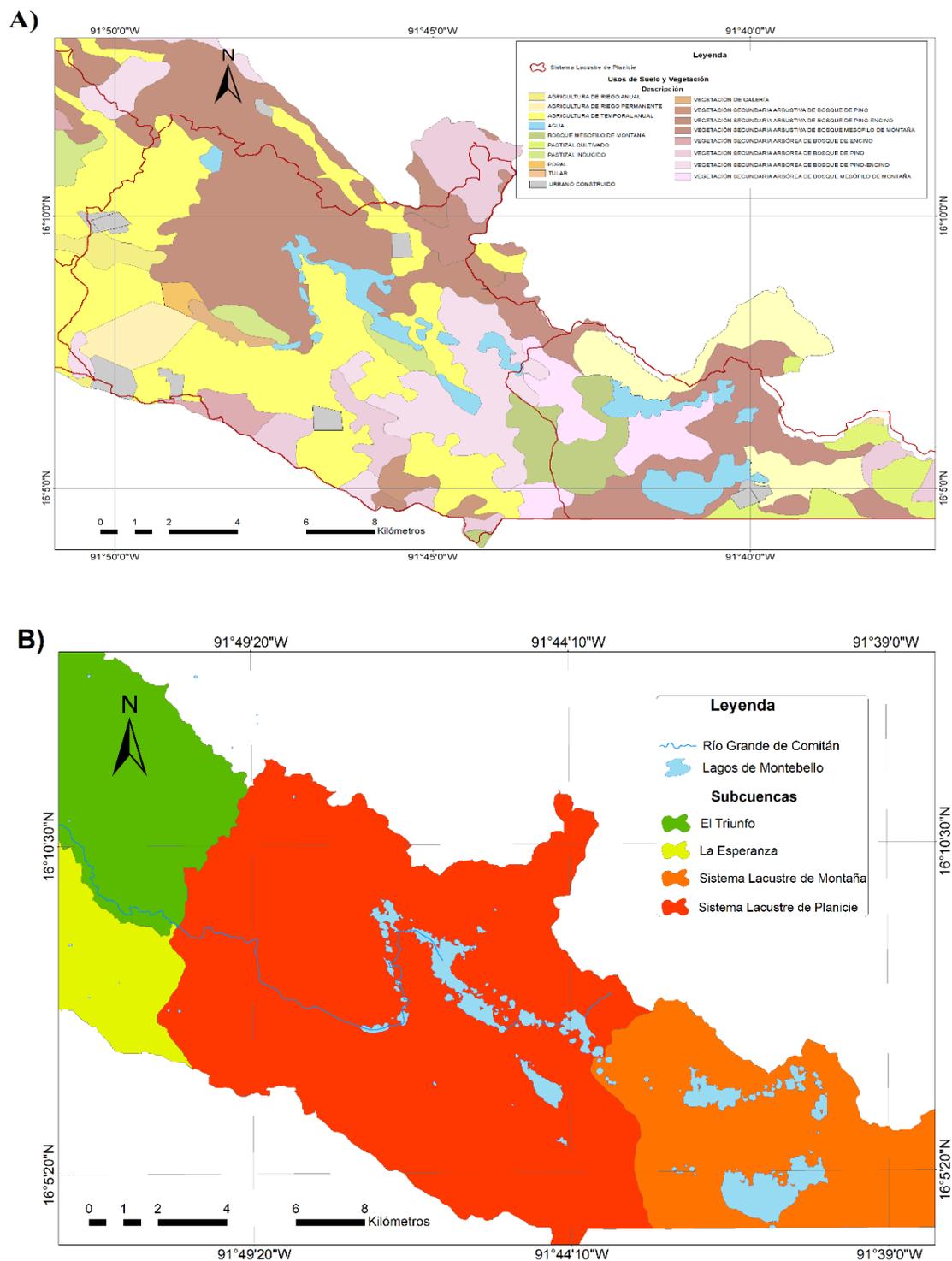


Figura 4.7 Datos de entrada para la estimación de caudal con el método racional: A) Usos de Suelo y Vegetación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, B) Mapa de delimitación de la subcuenca hidrográfica Sistema Lacustre de Planicie. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos vectoriales de INEGI y Alvarado (2015; et al. 2022).

4.8.1 Coeficiente de escurrimiento (C_e)

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se estima a partir de la NOM-011-CONAGUA-2015, se utilizan como datos de entrada la precipitación registrada en la estación Lagunas de Montebello y CHIRPS ajustado, el conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación serie VI a escala 1:250,000 de INEGI y la clasificación de suelos en la subcuenca. De acuerdo con Martínez (2015), la subcuenca se caracteriza por presentar suelos arcillosos (mayor al 50%) con drenaje moderado a deficiente.

A partir de la información anterior, se clasificó el uso de suelo y vegetación de la subcuenca en nueve zonas (bosque, pastizal, agricultura de riego anual, agricultura permanente y agricultura de temporal anual, vegetación secundaria arbórea y arbustiva, popal, urbano y agua). Para cada clasificación se establecen los valores del factor k de acuerdo con el tipo de suelo (impermeable) y finalmente se calcula para toda la subcuenca el valor de K ponderado (ecuación 20). Se estima un C_e mensual y anual para datos de la estación meteorológica y para CHIRPS ajustados.

4.8.2 Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF)

Se elaboraron las curvas de I-D-F para datos de precipitación diaria registrados por la estación EMAS Lagunas de Montebello y para CHIRPS. Para la elaboración de las curvas se suelen utilizar series con registros superiores a 20 años, sin embargo, con 10 años de registros se pueden realizarse extrapolaciones para la obtención de curvas I-D-F (OMS, 2011). La estación meteorológica Lagunas de Montebello tiene un registro de nueve años, período comprendido entre 2013 a 2021, por lo tanto, se elaboraron dos curvas I-D-F con datos de precipitación máxima diaria (mm) registrados durante nueve años por la estación meteorológica y CHIRPS.

a) Curvas I-D-F para datos de precipitación registrados en la estación meteorológica

Se identifica mensualmente, la precipitación máxima diaria en 24 horas para periodos de tiempo de 1, 2, 3, 4, 6, 12 y 24 horas para cada año. Posteriormente, se seleccionan los eventos máximos anuales para cada intervalo de duración.

Una vez obtenidas las precipitaciones máximas para diferentes periodos de duración, es necesario convertir las mediciones expresadas en alturas de precipitación (mm) en intensidades (mm/h) por medio de la ecuación (22).

Después se realiza el ajuste por método de Gumbel tipo I con la finalidad de estimar la precipitación máxima probable para cada intervalo de tiempo. Inicialmente, se calculan la media (\bar{x}), desviación estándar (S), variable α y β a partir de las ecuaciones (24 - 27). El período de retorno (T) se calcula a partir de la ecuación (23) y se establece para un año.

b) Curvas I-D-F para datos de precipitación registrados por CHIRPS

Los datos de precipitación diaria de CHIRPS se ajustan con el valor de sesgo de campo estimado previamente. A partir de los datos se selecciona la precipitación máxima diaria en 24 horas. Posteriormente, se ajustan los datos a una función de distribución tipo 1 de Gumbel a partir de las ecuaciones (24 -27).

Después se estiman las precipitaciones máximas probables para distintas frecuencias. Posteriormente, se estima el período de retorno para un año con base en la ecuación (23). Las precipitaciones máximas estimadas se multiplican por el factor 1.13 con la finalidad de aproximar las magnitudes de precipitación a valores reales de precipitación.

A partir de los datos anteriormente estimados y con los coeficientes propuestos por Campos (1998) para diferentes duraciones (ver Tabla 4.3), se determinaron las precipitaciones máximas diarias para diferentes tiempos de duración y periodos de retorno.

Con los valores anteriormente estimados de precipitación máxima diaria, se calculan las intensidades de lluvia (mm/h) para intervalos de duración de 1, 2, 3, 4, 6, 12 y 24 horas, se utiliza la ecuación (22).

Tabla 4.3 Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas.

Duraciones, en horas									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Fuente: Campos (1978).

El proceso previamente descrito para estimar el caudal superficial con el método racional se resume en el diagrama de la Figura 4.8.

4.9 Comparación de métodos: área – velocidad y racional

Una vez calculadas las variables de entrada, se estima el escurrimiento máximo mensual y anual en la subcuenca de estudio a partir de la ecuación (18) con base en los resultados obtenidos para la estación Lagunas de Montebello y el producto satelital CHIRPS, se realizó una comparación del escurrimiento máximo mensual estimado a partir del método área-velocidad.

Los resultados obtenidos con el método racional se validan con las métricas estadísticas de correlación de Pearson (r), R^2 , MAE y RMSE.

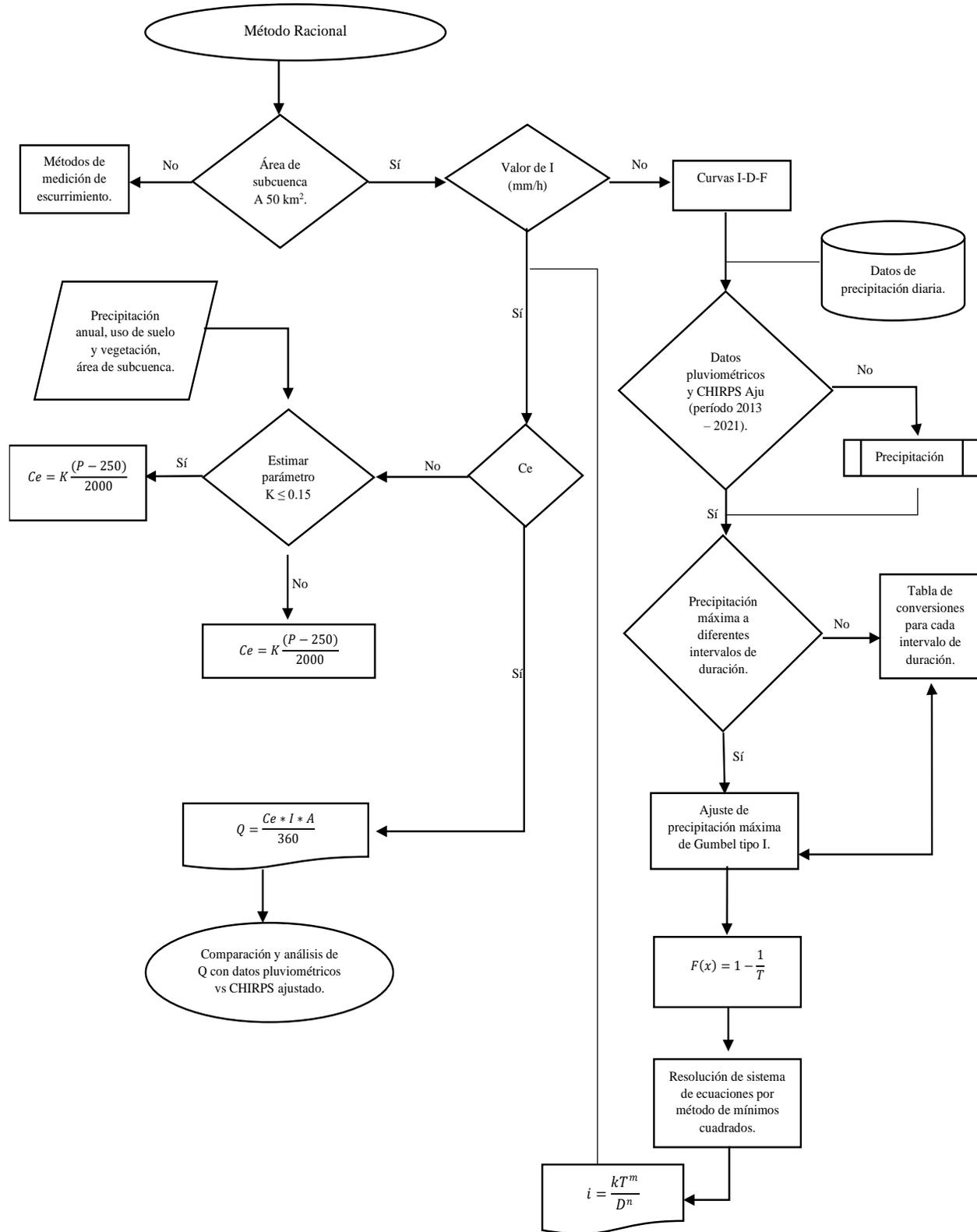


Figura 4.8 Diagrama del proceso de Método Racional.

5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en tres secciones, en la primera se describe la calibración y validación de los datos de precipitación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas. En la segunda sección se estima la cantidad de agua que escurre superficialmente por el método área-velocidad, además se calcula el volumen de agua que escurre subterráneamente entre octubre del 2014 a marzo del 2015 mediante un balance hidrológico en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas; en la última sección se analiza la estimación del escurrimiento superficial por el método racional.

5.1 Precipitación

En el Anexo I, se muestran la base de datos con información correspondiente a la precipitación diaria proporcionada por el SMN para la estación meteorológica Lagunas de Montebello y la base de datos de CHIRPS.

El análisis previo para determinar la calidad de las series temporales disponibles para la estación meteorológica se muestra en la Tabla 5.1. El análisis consistió en la obtención de precipitación acumulada, precipitación máxima y el porcentaje de datos disponibles. La estación meteorológica Lagunas de Montebello presenta una disponibilidad del ciento por ciento de datos para el período de estudio. Con respecto a los parámetros estadísticos se observa que el valor máximo de precipitación supera los 70 mm en 2015. De acuerdo con los resultados, durante el período de estudio el año con mayor precipitación fue el año 2015.

Tabla 5.1 Análisis estadístico de la precipitación diaria (mm) en la estación meteorológica Lagunas de Montebello, CONAGUA, durante el período: enero de 2014 a diciembre de 2015.

Año	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Acumulada (mm)	Desviación estándar	Datos disponibles (%)
2014	0	58.2	1, 801.8	9.4	100
2015	0	77.4	1, 902.2	10.4	100

Con respecto a la variabilidad climática estacional, la estación Lagunas de Montebello presenta una temperatura uniforme en gran parte del año. De acuerdo con la temperatura ambiental registrada durante período de estudio: la fría de noviembre a marzo con un valor mínimo de 14.2°C en enero y un máximo de 17.6 °C en marzo, la época cálida ocurre de abril a octubre con variaciones entre 18.5 °C a 19.7 °C, el mes de abril reporta la máxima temperatura (Tabla 5.2).

La precipitación registrada en la estación presenta variaciones significativas (29.8 mm a 366.3 mm), las mayores precipitaciones ocurren de junio a noviembre con precipitaciones superiores a 163 mm, siendo septiembre el mes con el valor máximo de lluvia. Los meses de marzo a abril registran precipitaciones inferiores a 51 mm (Tabla 5.2), el mes con menor lluvia registrada es abril (Figura 5.1).

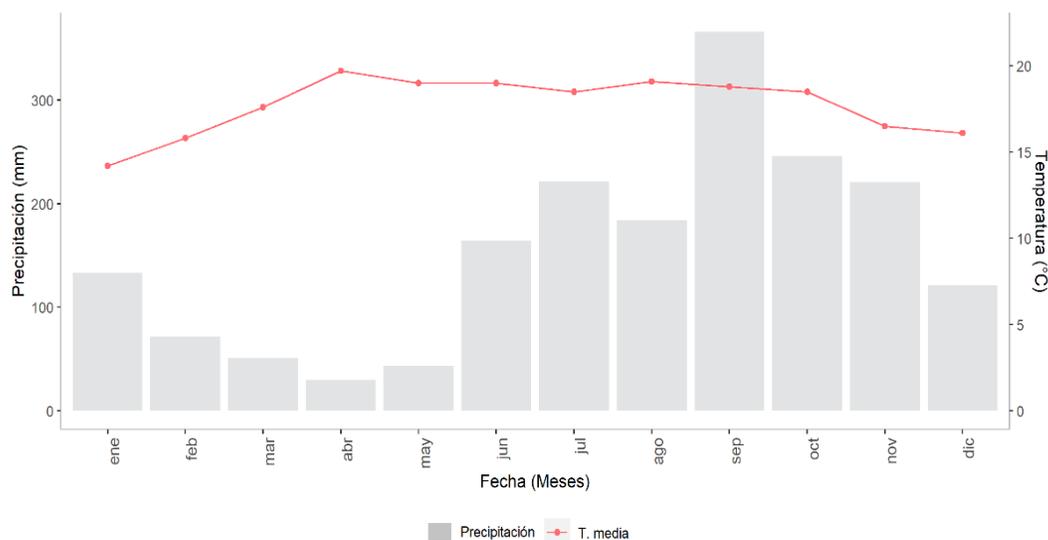


Figura 5.1 Climograma de la estación meteorológica Lagunas de Montebello, para el período: enero de 2014 a diciembre de 2015. Nota. La temperatura del aire (°C) representada por la línea roja. La precipitación (mm) en columnas grises. Fuente: elaborada a partir de los datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), CONAGUA.

Tabla 5.2 Datos de temperatura (°C) y precipitación mensual (mm) y anual (mm) en la estación meteorológica Lagunas de Montebello, Servicio Meteorológico Nacional (SMN), CONAGUA (período 2014-2015).

Parámetros de la estación meteorológica	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación media (mm)	132.9	71.6	51.1	29.8	43.4	163.8	221.2	183.7	366.3	246.2	221	121	154.3
Temperatura media (°C)	14.2	15.8	17.6	19.7	19.0	19.0	18.5	19.1	18.8	18.5	16.5	16.1	17.7

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre las series de precipitación diaria registradas en la estación meteorológica (*in situ*) y CHIRPS (píxel). En el análisis exploratorio se encontró que CHIRPS presenta variaciones significativas durante la época de lluvias debido a que se registran valores inferiores en comparación con las estaciones *in situ*.

En la Figura 5.2, se muestra la comparación de precipitación diaria CHIRPS (píxel) sin corregir con respecto a la estación Lagunas de Montebello (*in situ*) para el período de estudio. Se puede apreciar que los valores extremos diarios registrados por CHIRPS en su mayoría son inferiores a los registrados por la estación meteorológica. El valor máximo reportado por CHIRPS es 55.2 mm, mientras que la estación reporta en tierra 77.4 mm. Además, se observan subestimaciones en la mayoría de los datos CHIRPS, ya que la estación registra lluvia en época de secas, principalmente durante el año 2015, que el producto satelital no logra detectar. En general, se observa que la

precipitación diaria registrada por CHIRPS tiene un desfase en el tiempo en comparación con la precipitación registrada en la estación.

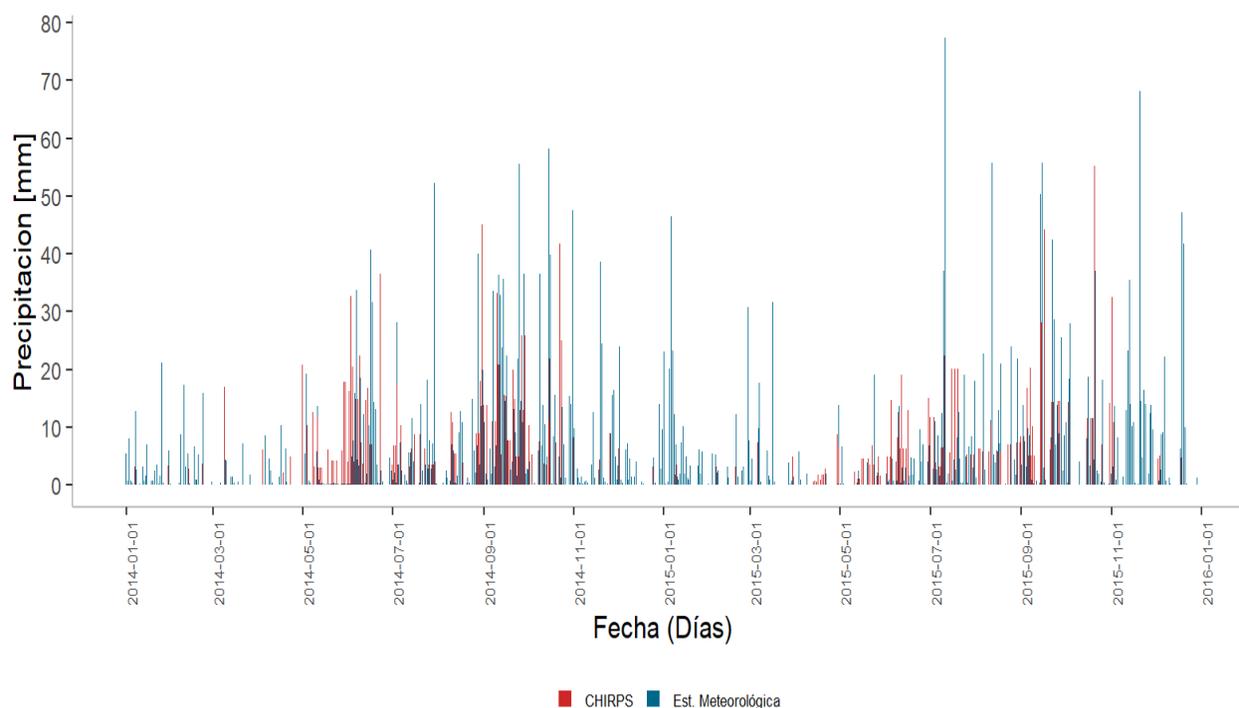


Figura 5.2 Histograma de precipitación acumulada diaria (mm) registrada in situ (Est. Meteorológica) y simulada (CHIRPS) en la estación Lagunas de Montebello, Chiapas.

El análisis comparativo también incluyó la validación de datos CHIRPS diarios y mensuales a partir de las métricas estadísticas usadas: correlación de Pearson (r), raíz del error cuadrático medio (RMSE), índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). De acuerdo con los resultados que se muestran en la Tabla 5.3, se determinó que a escala diaria CHIRPS exhibe una correlación despreciable ($r = 0.33$). Por su parte, CHIRPS a escala mensual presenta una correlación positiva alta ($r = 0.74$) con respecto a los datos de la estación meteorológica. A resolución diaria y mensual CHIRPS exhibió un desempeño insatisfactorio para NSE, sin embargo, el RMSE exhibe un valor igual a 10.14 a escala diaria, indicando un mejor ajuste en comparación de CHIRPS a resolución mensual.

Tabla 5.3 Validación de precipitación acumulada (mm) estimada a resolución diaria y mensual por CHIRPS.

Estadístico	r		NSE		RMSE	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Lagunas de Montebello	0.33	0.74	-0.04	0.07	10.14	101.74

5.1.1 Análisis a escala temporal

Los datos que se utilizaron para el análisis de precipitación diaria y mensual dentro de la subcuenca de estudio se presentan en el Anexo I y II. A partir de los datos seleccionados en ambas bases de datos se calcula el sesgo de campo a escala diaria y mensual.

En la Tabla 5.4 se muestra el sesgo promedio calculado a partir de la precipitación diaria y mensual simulada con el producto satelital CHIRPS para la estación meteorológica. El valor del sesgo se obtiene del promedio del factor multiplicativo de las medias entre las observaciones de precipitación *in situ* y la estimación del modelo satelital en el sitio de medición (Robles-Morua *et al.*, 2012). El sesgo de la muestra en ambos supera el 100%, sin embargo, a escala mensual el valor se triplica.

Tabla 5.4 Valores de sesgo medio (\bar{B}) para datos diarios y mensuales de precipitación (mm) en la estación de monitoreo Lagunas de Montebello, Chiapas.

Período 2014 - 2015		
Estación	\bar{B}_{Diario}	\bar{B}_{Mensual}
Lagunas de Montebello	1.85	5.48

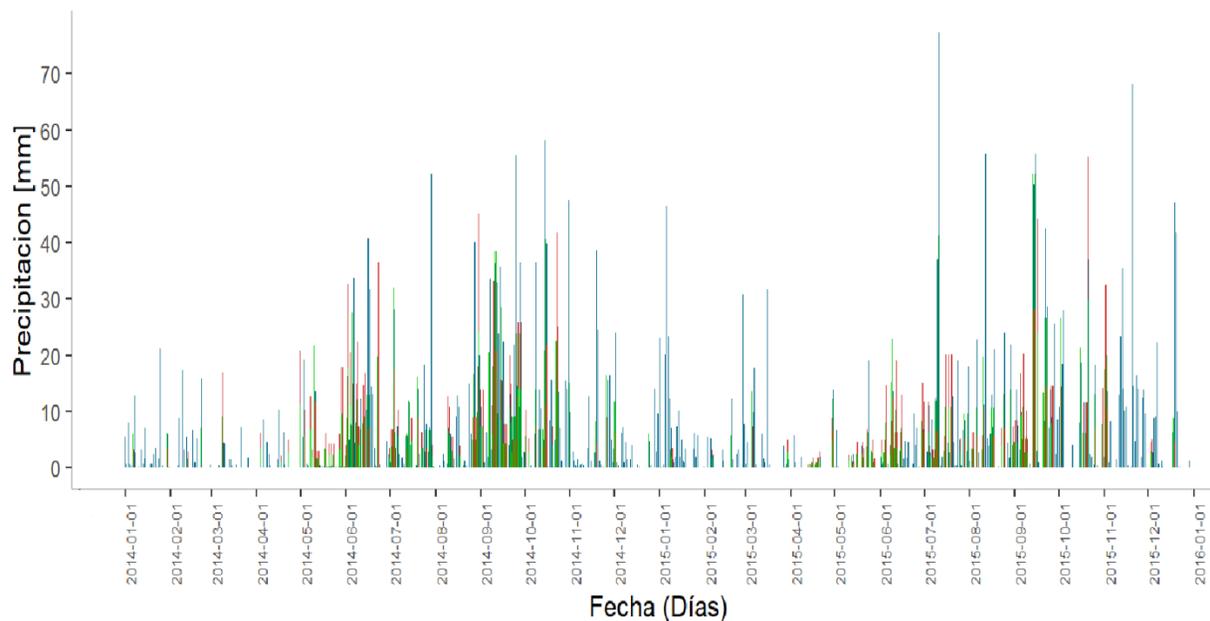
Se utilizaron las series de precipitación diaria y mensual junto con los valores de sesgo estimados, para realizar el ajuste de datos CHIRPS a escala diaria y mensual. Las bases de datos que se obtuvieron se presentan en el Anexo I y II.

Como se observa en las gráficas de la Figura 5.3, los datos diarios de precipitación satelital mejoran notablemente después del ajuste, sin embargo, siguen presentando en su gran mayoría subestimaciones. Por lo tanto, los datos ajustados no representan en su totalidad la variabilidad temporal de la precipitación que cae en la subcuenca.

Con respecto a los datos mensuales, se observa que no presenta un mejor ajuste debido a las sobrestimaciones que se aprecian durante los meses de mayor precipitación registrados por la estación *in situ*. Como resultado, los datos a escala mensual no representan mejor la variabilidad de la precipitación en la región en comparación con la precipitación corregida a escala diaria. Además, en algunos casos al comparar la precipitación *in situ* con el píxel, se observan meses (marzo y junio de 2014 y abril a mayo de 2015) con valores de lluvia muy cercanos (con una diferencia menor a 5 mm), por lo tanto, al realizar el ajuste en dichos meses, ocasiona que la diferencia entre ambos productos aumente notoriamente.

Los datos de CHIRPS ajustados (diario y mensual) se validaron a partir del cálculo de las siguientes métricas: coeficiente de correlación de Pearson (r), raíz del error cuadrático medio (RMSE), índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los resultados se presentan en la Tabla 5.5.

A)



B)

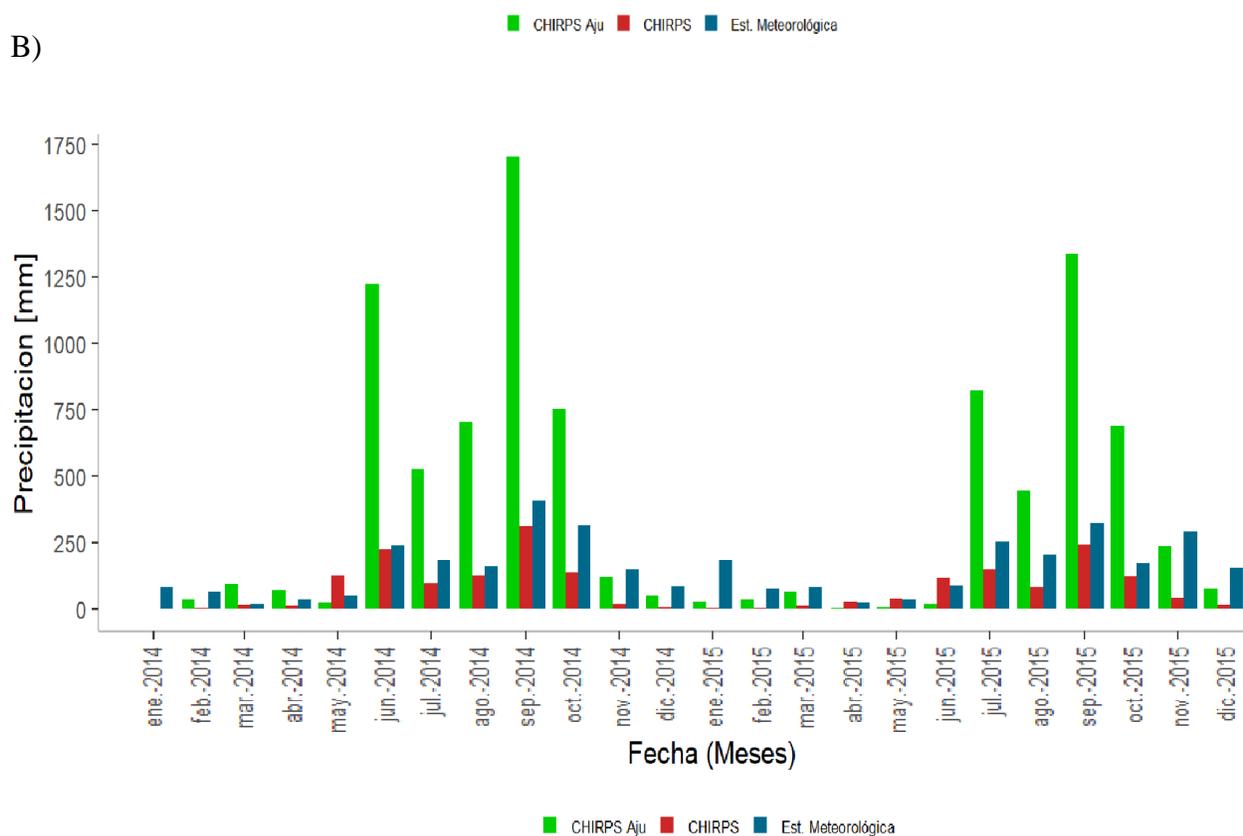


Figura 5.3 Series de precipitación acumulada (mm) registrada en la estación meteorológica (in situ) y CHIRPS (píxel) y CHIRPS ajustado (CHIRPS Aju) en la estación de monitoreo Lagunas de Montebello. A) Escala diaria, B) Escala mensual.

Con el análisis estadístico se encontró que CHIRPS ajustado exhibe una correlación moderada a escala diaria ($r = 0.58$), mientras que a escala mensual se observa una correlación alta ($r = 0.84$).

Por otra parte, CHIRPS exhibió un mejor ajuste a escala diaria con respecto a RMSE (8.5), sin embargo, los valores de NSE son insatisfactorios para ambas resoluciones (NSE [-18 y 3]). De acuerdo con los resultados de correlación, los datos mensuales presentan un mejor ajuste, por lo tanto, se utilizan como datos de entrada para el método racional con la finalidad de estimar el escurrimiento superficial en la subcuenca de interés.

Tabla 5.5 Validación de precipitación acumulada (mm) a resolución diaria y mensual con datos CHIRPS ajustado.

Estadístico	r		NSE		RMSE	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Lagunas de Montebello	0.58	0.84	0.27	-17.61	8.49	455.66

5.1.2 Análisis a escala estacional

Además del análisis temporal, también se realizó un análisis estacional para conocer el comportamiento de la precipitación estimada con CHIRPS con respecto a la temporada de lluvias o húmeda, que corresponde a los meses de junio a noviembre y la temporada relativamente seca o cálida, que ocurre dentro de los meses de diciembre a mayo (ver Figura 5.1). Se llevó a cabo un análisis comparativo entre las series de precipitación *in situ*, CHIRPS y CHIRPS ajustado. Se analizó la eficiencia de CHIRPS con y sin ajuste mediante las métricas estadísticas: r , NSE y RMSE.

En la Tabla 5.6 se comparan los resultados obtenidos para cada métrica usando CHIRPS y CHIRPS ajustado a escala diaria. Los valores estimados con CHIRPS sin corregir exhibieron una correlación baja ($r = 0.31$) para la época húmeda y despreciable ($r = 0.07$) para la época seca. Además, CHIRPS exhibió un desempeño insatisfactorio para ambas épocas (NSE=-0.1) y un ajuste bajo con respecto a RMSE. Por lo tanto, la variabilidad temporal de la precipitación en la época de lluvias y secas no se encuentra bien representada.

CHIRPS ajustado exhibe una correlación moderada ($r = 0.59$) y despreciable ($r = 0.2$) para la época húmeda y seca respectivamente, además, los valores de NSE indican un desempeño insuficiente. Con respecto a la métrica RMSE CHIRPS ajustado exhibió un ajuste bajo. Los resultados indican que la correlación y el desempeño de CHIRPS ajustado con respecto a la precipitación *in situ*, no mejoró con respecto a CHIRPS sin ajustar.

Tabla 5.6 Validación de precipitación diaria (mm) a escala estacional para CHIRPS ajustado.

Lluvias						
Producto	<i>r</i>		NSE		RMSE	
	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju
Lagunas de Montebello	0.31	0.59	-0.1	0.3	12.68	10.26

Secas						
Producto	<i>r</i>		NSE		RMSE	
	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju
Lagunas de Montebello	0.07	0.26	-0.1	0.04	6.7	6.23

Nota: CHIRPS Aju = CHIRPS ajustado.

De acuerdo con la Tabla 5.7, el ajuste realizado a los datos CHIRPS a resolución mensual, es satisfactorio porque presentan mejores resultados y, por lo tanto, mejora la simulación de la precipitación. El ajuste efectuado en los datos CHIRPS a escala mensual exhibió una correlación moderada ($r = 0.6$), mientras que CHIRPS ajustado exhibió una correlación alta ($r = 0.7$) durante la época de lluvias, sin embargo, los valores para NSE exhibieron un desempeño insatisfactorio para CHIRPS (NSE = -0.9) y CHIRPS ajustado (NSE = -54.7) y los valores RMSE son altos, por lo tanto, el ajuste de los datos CHIRPS es malo.

Con respecto a la época seca, la correlación es despreciable para CHIRPS y CHIRPS ajustado ($r < 0.11$), además, los valores de NSE (< -0.6) indica que el desempeño es insatisfactorio y que el ajuste de CHIRPS ajustado y sin ajustar es malo de acuerdo con los valores de RMSE calculados. Por lo tanto, los valores corregidos predichos no se ajustan óptimamente a los valores medidos *in situ* para la época de lluvias. En general, los datos simulados para la época de lluvias obtienen una mejor predicción para la variabilidad estacional de la precipitación que cae en la subcuenca en comparación con la época de secas.

Tabla 5.7 Validación de precipitación mensual (mm) a escala estacional para CHIRPS y CHIRPS ajustado.

Lluvias						
Producto	<i>r</i>		NSE		RMSE	
	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju
Lagunas de Montebello	0.64	0.76	-0.86	-54.62	117.4	641.5

Secas						
Producto	<i>r</i>		NSE		RMSE	
	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju	CHIRPS	CHIRPS Aju
Lagunas de Montebello	-0.28	0.11	-1.97	-0.6	83.17	60.96

Nota: CHIRPS Aju = CHIRPS ajustado.

Además, se realizó un análisis gráfico de cajas y bigotes que muestra la distribución diaria y mensual de la precipitación para la estación meteorológica, producto CHIRPS y CHIRPS ajustado. Con respecto a los datos diarios (ver Figura 5.4) se aprecia que CHIRPS tiene valores de precipitación inferiores a los registrados por la estación, sin embargo, los valores ajustados no representan adecuadamente la variación de la precipitación, debido a que existen diferencias significativas entre las medianas. La mediana estimada para la época de lluvias en la estación es igual a 5.2 mm, mientras que para CHIRPS es de 3.2 mm y para CHIRPS ajustado es igual a 2 mm. Los valores de precipitación extrema estimados por la estación registran valores superiores a 70 mm, mientras que los datos obtenidos a partir del modelo calibrado superan los 40 mm, sin embargo, son inferiores a 60 mm.

Los datos a escala mensual estimados por CHIRPS sin ajustar (ver Figura 5.5) presentan valores cercanos a los registrados por la estación, sin embargo, al realizar el ajuste los datos superan los valores registrados en tierra. Existen valores muy cercanos entre CHIRPS y la estación que al ser ajustados generan que el sesgo entre ellos incremente, ocasionando que los valores no representen satisfactoriamente la variabilidad estacional de la precipitación en la subcuenca. La mediana de los datos mensuales en época de lluvias para la estación es de 221.9 mm, para CHIRPS es 126.9 mm y para CHIRPS ajustado es de 695.7 mm, mientras que durante la época de secas se registra una mediana de 71.6 mm, 12.7 mm y 36 mm para la estación, CHIRPS Y CHIRPS ajustado respectivamente.

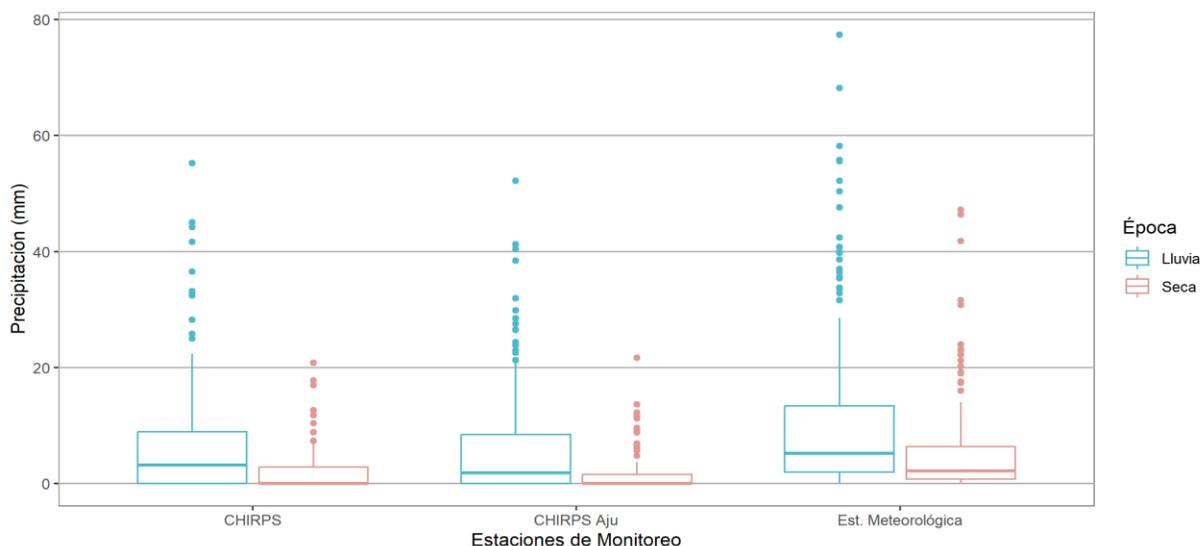


Figura 5.4 Gráfico de precipitación acumulada diaria (mm) estimada por la estación meteorológica, CHIRPS y CHIRPS ajustado (CHIRPS Aju) en diagrama de cajas correspondientes a la estación de monitoreo Lagunas de Montebello.

De acuerdo con las Figuras 5.4 y 5.5, CHIRPS ajustado a escala diaria representa mejor la variabilidad estacional de la precipitación durante el período de estudio. Durante la época de lluvias se registran en tierra valores diarios extremos superiores a 55 mm y a escala mensual se registran precipitaciones mayores a 300 mm, dichos valores no pueden ser detectados por el sensor

infrarrojo. Además, esta zona se caracteriza por presentar una alta formación de nubes en gran parte del año, por lo tanto, genera subestimaciones en las estimaciones de precipitación.

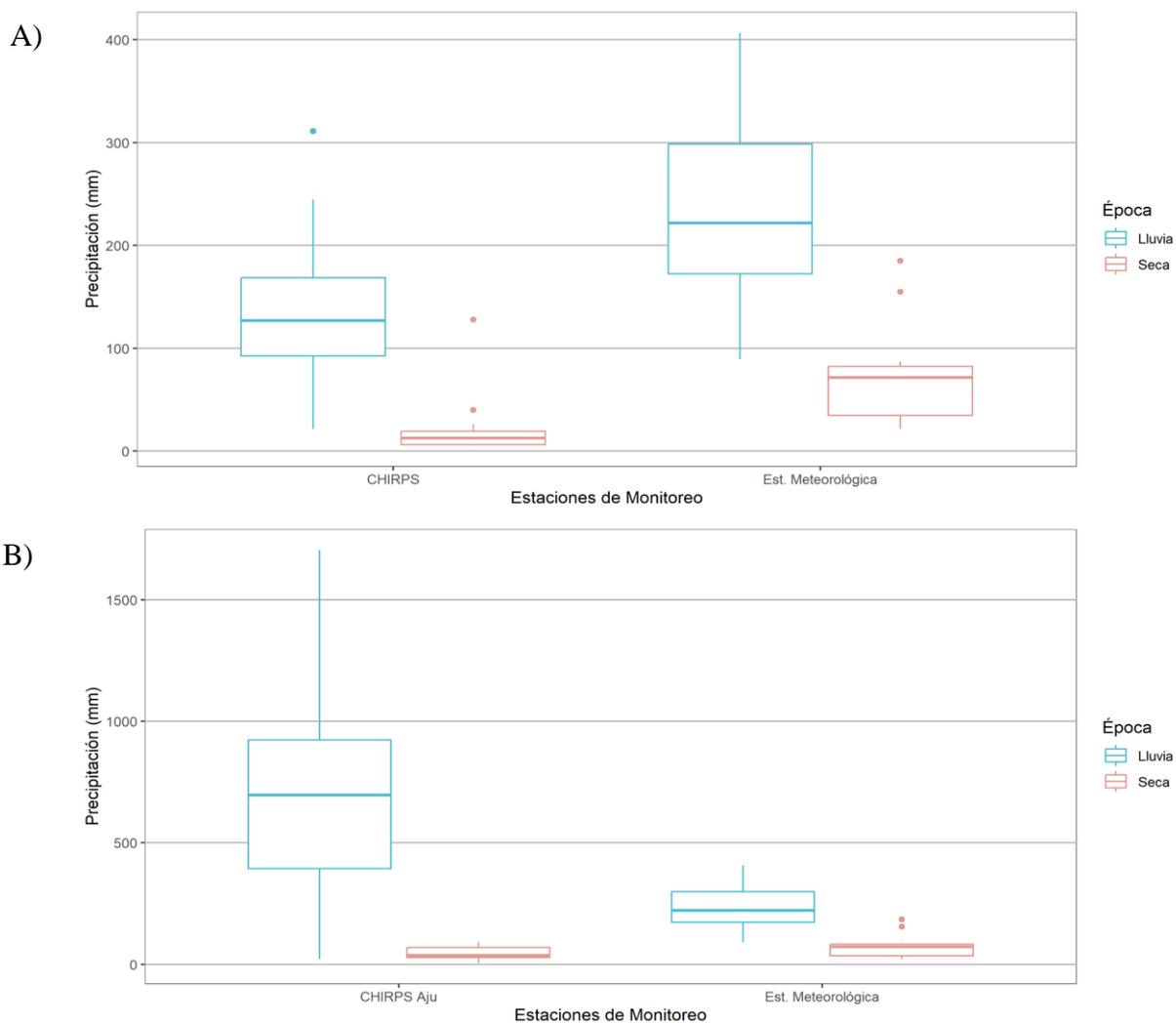


Figura 5.5 Gráfico de precipitación acumulada mensual (mm) en diagrama de cajas correspondientes a la estación de monitoreo Lagunas de Montebello. A) Estación meteorológica y CHIRPS, B) Estación meteorológica y CHIRPS ajustado (CHIRPS Aju).

5.2 Estimación de escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial dentro de la subcuenca se estimó a partir de dos sitios ubicados a lo largo del río principal: El Carrizal y El Paso de Soldado, considerados como entrada y salida del cauce respectivamente. La estimación de escurrimiento superficial se realizó por el método área-velocidad a partir de mediciones de aforo con molinete, ecuación de Manning y datos de monitoreo de nivel del caudal con sensores de presión para ambos sitios durante 2014 y 2015.

5.2.1 Estimación de caudal mediante el método de aforo

En la Tabla 5.8 se muestran los aforos hechos en Carrizal, se puede observar que a menor profundidad aumenta el tirante y el radio hidráulico, pero el perímetro de mojado disminuye. Además, la profundidad mínima se registró durante el aforo realizado en noviembre de 2021. Con respecto al caudal, el valor máximo se registró en mayo de 2022. La medición que se hizo durante noviembre coincide con la época húmeda, mientras que el aforo de mayo se realiza durante la temporada seca, por lo tanto, las variaciones de precipitación a escala estacional y anual en el sitio de muestreo pueden influir en el caudal del río.

Tabla 5.8 Aforos correspondientes al sitio de monitoreo El Carrizal.

El Carrizal								
Fecha	Profundidad (m)	Área (m ²)	Ancho (m)	Tirante (m)	Pm (m)	Rh (m)	V _{prom} (m/s)	Q (m ³ /s)
nov-21	0.03	0.62	20.2	0.3	20.26	0.031	0.4	0.28
may-22	0.11	2.139	18.6	0.38	18.82	0.114	1.15	2.44

Con respecto al sitio de monitoreo ubicado en Paso del Soldado se obtuvieron tres aforos (Tabla 5.9), solo uno corresponde con el período de estudio.

Los valores máximos de área, tirante, perímetro de mojado y velocidad corresponden a mayo de 2014, los valores mínimos corresponden a octubre de 2019. Es importante mencionar que el caudal mínimo se registra durante el mes de octubre, sin embargo, dicho mes corresponde a la época de mayor humedad en la región, en cambio, durante el mes de mayo se registra el caudal máximo y corresponde a la época seca.

Tabla 5.9 Aforos correspondientes al sitio de monitoreo Paso del Soldado.

Paso del Soldado									
Fecha	Nivel de referencia (m)	Profundidad (m)	Área (m ²)	Ancho (m)	Tirante (m)	Pm (m)	Rh (m)	V _{prom} (m/s)	Q (m ³ /s)
may-14	2.24	1.06	15.45	8.55	0.585	10.77	1.43	0.24	3.92
oct-19	2.94	0.37	9.43	8.55	-0.105	9.27	1.20	0.1	0.94
nov-21	2.64	0.66	12.93	8.6	0.185	9.97	1.3	0.12	1.09

5.2.2 Estimación del caudal por el método área-velocidad

Se estima la velocidad a partir de la ecuación de Manning, cuyas variables son radio y pendiente hidráulica (Sh), coeficiente de rugosidad (η) y velocidad media.

El valor de rugosidad (η) se determina de acuerdo con las características del sitio de monitoreo. Para el sitio Carrizal se estimó un valor de $\eta = 0.014$, mientras que para el Paso del Soldado se estimó un valor de $\eta = 0.035$. Además, se determina una $Sh = 0.00486946$ y $Sh = 4.24092 \times 10^{-5}$ para Carrizal y Paso del Soldado respectivamente.

En las Tablas 5.10 y 5.11 se presentan los valores estimados para tirante, velocidad, área y caudal medio a partir de las mediciones de presión con sensores instalados en cada sitio de monitoreo.

Para el sitio El Carrizal, se observa que la velocidad obtenida a partir de Manning presenta un comportamiento decreciente con el tiempo. Durante el mes de octubre se estima un caudal máximo superior a 8 m³/s y el caudal mínimo se registra en abril con un valor igual a 2.5 m³/s.

Tabla 5.10 Estimación del caudal mensual (m³/s) en el sitio de monitoreo El Carrizal a partir de las variables de área y velocidad.

Fecha	Tirante (m)	A(m ²)	Rh(m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
oct-14	0.52	4.78	0.26	1.86	8.79
nov-14	0.42	2.78	0.15	1.32	3.36
dic-14	0.40	2.51	0.13	1.28	3.25
ene-15	0.41	2.69	0.14	1.29	3.18
feb-15	0.39	2.32	0.12	1.21	2.86
mar-15	0.38	2.18	0.12	1.16	2.58
abr-15	0.38	2.16	0.11	1.15	2.55
may-15	0.40	2.51	0.13	1.23	2.80
jun-15	0.40	2.38	0.13	1.23	3

Nota. A = área, Rh = radio hidráulico, V= velocidad y Q= caudal.

El hidrograma del río en el sitio El Carrizal se observa en la Figura 5.6. El gráfico representa las variaciones del cauce a lo largo de nueve meses, se aprecia una disminución paulatina del caudal de noviembre a abril variando entre 3 a 2 m³/s, pero no se observan variaciones significativas en el caudal durante el período de estudio.

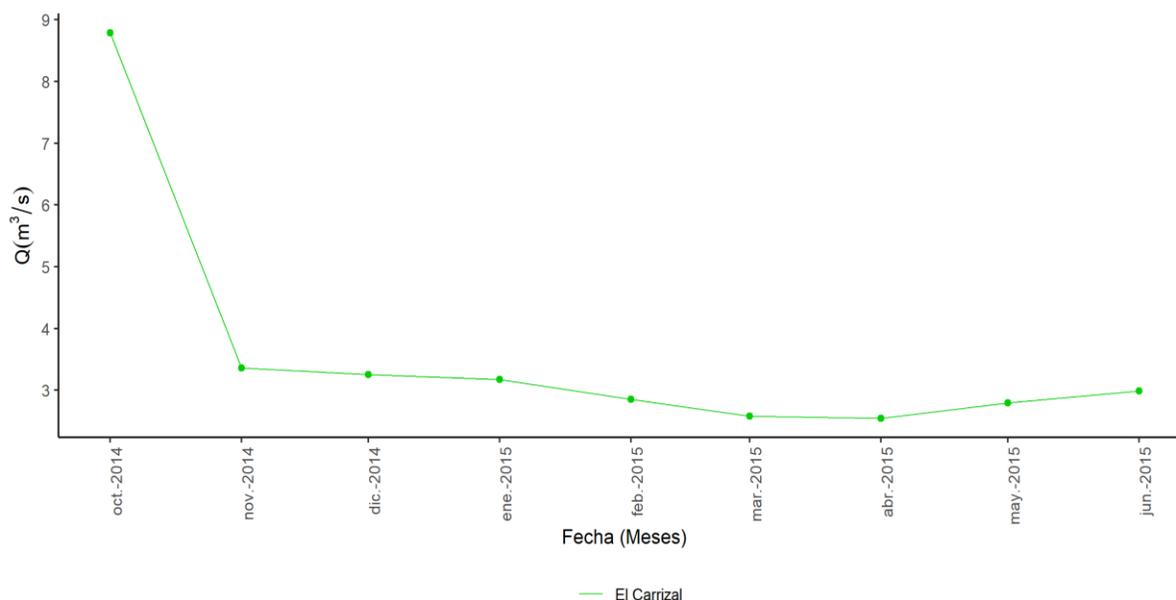


Figura 5.6 Hidrograma de caudal medio mensual (m³/s) en el sitio de monitoreo El Carrizal.

Tabla 5.11 Estimación del caudal mensual (m^3/s) en el sitio de monitoreo Paso del Soldado a partir de las variables de área y velocidad.

Fecha	Tirante (m)	A (m^2)	Rh (m)	V (m/s)	Q (m^3/s)
ene-14	0.6	15.53	1.43	0.24	3.67
feb-14	0.5	14.68	1.37	0.23	3.38
mar-14	0.41	13.95	1.33	0.22	3.13
abr-14	0.38	13.53	1.3	0.22	3
may-14	0.42	13.98	1.33	0.22	3.14
oct-14	0.82	17.48	1.56	0.25	4.38
nov-14	0.6	15.52	1.43	0.24	3.67
dic-14	0.46	14.4	1.36	0.23	3.28
ene-15	0.45	14.24	1.35	0.23	3.23
feb-15	0.33	13.28	1.28	0.22	2.92
mar-15	0.3	12.94	1.26	0.22	2.81
abr-15	0.2	12.13	1.21	0.21	2.56
may-15	0.16	11.74	1.18	0.21	2.44
jun-15	0.03	10.61	1.11	0.2	2.12
jul-15	0.06	10.87	1.13	0.2	2.19
ago-15	0.03	10.65	1.11	0.2	2.13
sep-15	0.04	10.72	1.12	0.2	2.15
oct-15	0.11	11.34	1.16	0.2	2.33
nov-15	0.06	10.89	1.13	0.2	2.2
dic-15	0.03	10.62	1.11	0.2	2.12

Nota. A = área, Rh = radio hidráulico, V= velocidad y Q= caudal.

En relación con el sitio Paso del Soldado, la velocidad no presenta variaciones significativas durante el período de medición, además se mantiene constante de junio a diciembre 2015. En la Figura 5.7 se observa el histograma del caudal. Durante el 2014 el caudal varía entre 3 y 4 m^3/s y entre 2 a 3 m^3/s durante todo el 2015. El caudal máximo se registró en octubre de 2014 con un valor de 4.4 m^3/s . En cambio, el caudal mínimo es de 2.1 m^3/s y se estima para junio y diciembre de 2015. El caudal calculado durante 2014 es mayor al caudal estimado en 2015.

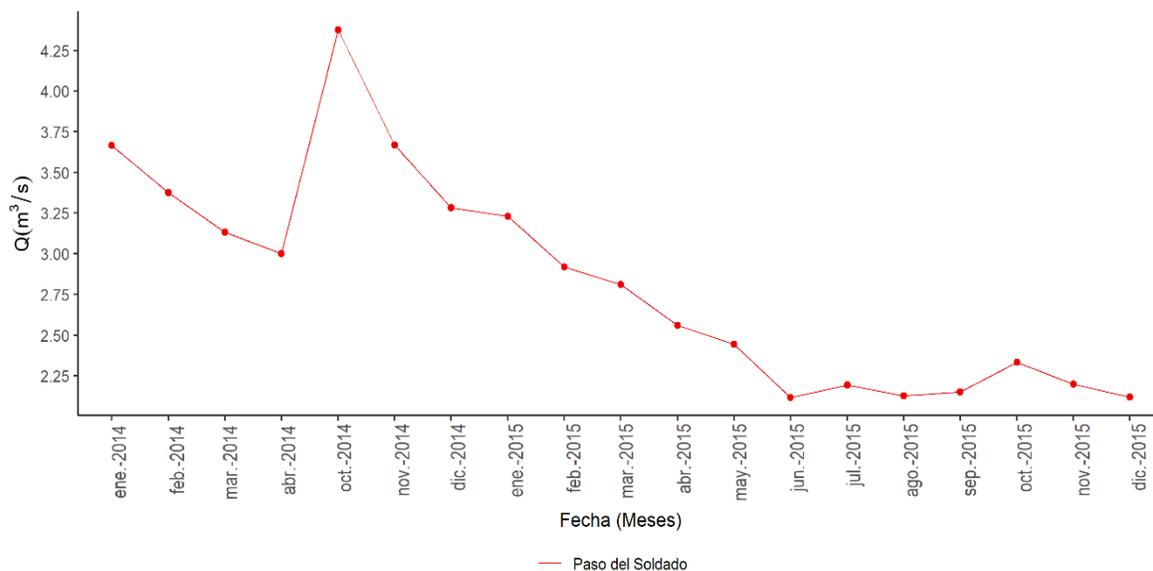


Figura 5.7 Hidrograma de caudal medio mensual (m^3/s) en el sitio de monitoreo Paso del Soldado.

De acuerdo con la información presentada en la gráfica 5.2 y con los análisis previos de precipitación, se observa un período húmedo de junio a noviembre y un período seco de diciembre a mayo. Se realizó una comparación entre ambos sitios de monitoreo para el período de octubre 2014 a junio 2015, es decir, únicamente con los meses en que coinciden las mediciones de los sitios de monitoreo.

En la Figura 5.8 se aprecia la comparación de los caudales medios en los dos sitios de monitoreo por época. El gráfico muestra que durante la época de lluvias se observa una mayor entrada y salida de caudal medio en la subcuenca, sin embargo, la entrada de escorrentía superficial a la subcuenca es mayor que la salida. En relación con la época de secas, no se aprecian diferencias significativas entre la entrada y la salida, ya que se estima una mediana de 2.86 para el sitio carrizal y 2.82 para el paso de soldado. Se estiman valores mínimos de 2.44 y 2.54 respectivamente, teniendo una variación menor a 1 entre la entrada y la salida, sin embargo, la media es igual a 2.9 mm para ambos sitios.

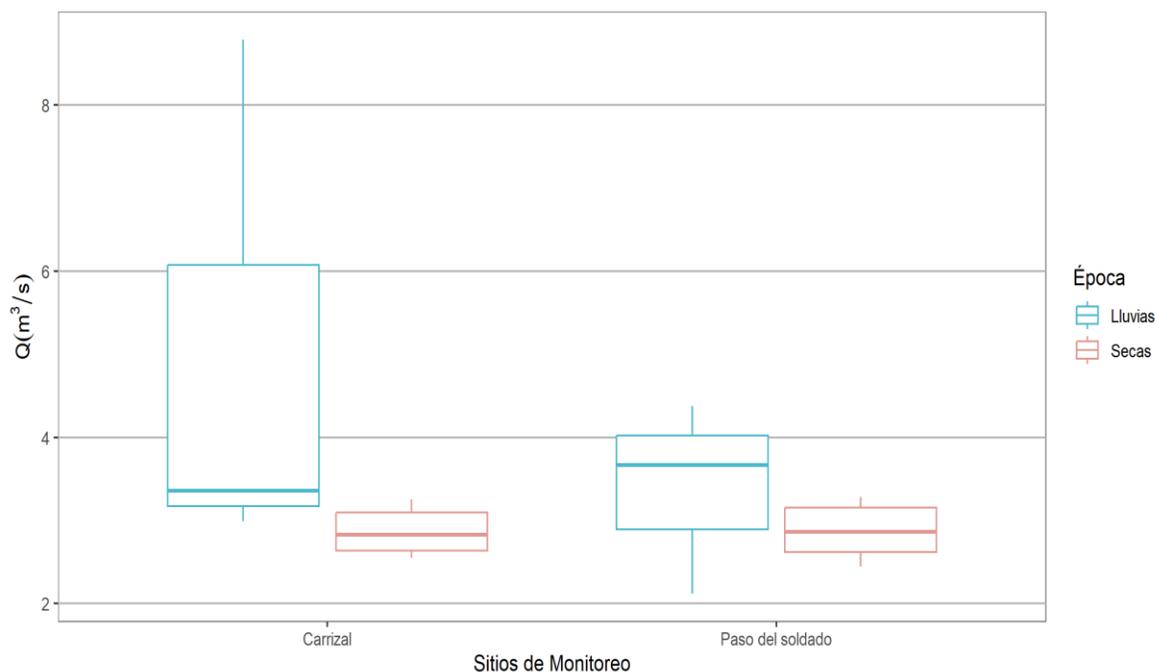


Figura 5.8 Caudal medio mensual estimado en El Carrizal y Paso del Soldado en diagrama de caja y bigotes.

5.3 Estimación de balance hidrológico en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie

Para el balance hidrológico se estimaron mensualmente los parámetros de precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), reserva (R), escurrimiento superficial (Q_{sup}) y escurrimiento subterráneo (Q_{sub}).

De acuerdo con la información, se obtuvo una precipitación anual de 1801.9 mm para 2014 y para 2015 de 1902.2 mm. Durante el 2014 y 2015, el mes más lluvioso se registra en septiembre (406.8 mm y 325.8 mm) y el mes menos lluvioso se registra en abril (34.8 mm y 24.8 mm). La época de humedad en la zona se registra durante los meses de junio a noviembre, con precipitaciones mayores a 149.6 mm, mientras que la época de secas se observa en diciembre a mayo.

La temperatura media mensual registrada en la estación se utiliza para el cálculo de evapotranspiración potencial (ETP) para un período de dos años, entre enero de 2014 a diciembre de 2015 (ver Anexo III). Se estimó una temperatura media anual para 2014 de 17.5 °C y para 2015 de 18 °C. Para el análisis de evapotranspiración se obtuvo un índice de calor anual para 2014 y 2015 de 80.24 y 83.59 respectivamente. Con respecto a la evapotranspiración potencial anual se estimó en 800.6 mm para 2014, mientras que para 2015 es de 819.2 mm. Los meses con mayor ETP son agosto y abril registrados durante 2014 y 2015 respectivamente.

A partir de los datos correspondientes de precipitación, evapotranspiración potencial y una reserva útil de agua igual a 370 mm se realiza un balance hídrico mensual en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. De acuerdo con los resultados (Tabla 5.12) se presenta un déficit de agua en el suelo (a un metro de profundidad) únicamente en los meses de abril a mayo de 2014. Los niveles

de humedad en el suelo incrementan a partir de junio de 2014, sin embargo, se tienen dos períodos en los que el excedente de agua en el suelo produce un escurrimiento superficial, el primero ocurre en septiembre de 2014 a marzo de 2015 y el segundo período inicia en julio y termina en diciembre de 2015. Durante el mes de septiembre se registran valores de humedad altos, con excedentes superiores a 250 mm/mes.

La evapotranspiración real presenta el mismo comportamiento que la evapotranspiración potencial con excepción de los meses de abril y mayo de 2014. Además, se estima una evapotranspiración real anual de 729.6 mm para 2014 y de 819.2 mm para el 2015, este último valor no varía con respecto a la evapotranspiración potencial estimada para el mismo año.

Tabla 5.12 Balance hídrico en el suelo para la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie con el método de Thornthwaite.

Fecha	P (mm)	ETP (mm)	P. Útil	Reserva	Excedente	Déficit	ETR (mm)
ene-14	80.8	41.54	39.26	39.26	0	0	41.54
feb-14	65.8	53.14	12.66	51.92	0	0	53.14
mar-14	21.8	71.11	-49.31	2.61	0	0	71.11
abr-14	34.8	80.15	-45.35	0	0	42.74	37.41
may-14	52	80.19	-28.19	0	0	28.19	52
jun-14	238.2	80.29	157.91	157.91	0	0	80.29
jul-14	185.6	78.84	106.76	264.67	0	0	78.84
ago-14	161.8	81.52	80.28	344.95	0	0	81.52
sep-14	406.8	72.32	334.48	370	309.43	0	72.32
oct-14	316.6	67.92	248.68	370	248.68	0	67.92
nov-14	149.6	48.03	101.57	370	101.57	0	48.03
dic-14	87	45.49	41.51	370	41.51	0	45.49
ene-15	185	42.75	142.25	370	142.25	0	42.75
feb-15	77.4	42.35	35.05	370	35.05	0	42.35
mar-15	80.4	60.51	19.89	370	19.89	0	60.51
abr-15	24.8	83.05	-58.25	311.75	0	0	83.05
may-15	34.8	82.77	-47.97	263.78	0	0	82.77
jun-15	89.4	79.85	9.55	273.33	0	0	79.85
jul-15	255.8	77.43	178.37	370	81.69	0	77.43
ago-15	205.6	81.29	124.31	370	124.31	0	81.29
sep-15	325.8	75.24	250.56	370	250.56	0	75.24
oct-15	175.8	74	101.8	370	101.8	0	74
nov-15	292.4	61.39	231.01	370	231.01	0	61.39
dic-15	155	58.56	96.44	370	96.44	0	58.56

Nota. P= precipitación, ETP= evapotranspiración potencial, ETR = evapotranspiración real.

Con la información disponible de precipitación, escurrimiento superficial y evapotranspiración real, se realizó un balance hidrológico para el período de octubre 2014 a marzo de 2015 en la subcuenca de estudio. De acuerdo con análisis previos el balance hidrológico se realiza principalmente durante la época seca. En la Tabla 5.13 se muestran los resultados obtenidos a partir de las variables estimadas previamente.

Se obtuvo una precipitación total de 896 mm que expresado en volumen es igual a 108,340,688.4, se considera que toda la precipitación que cae entra directamente al sistema lacustre. Además, se estima una evapotranspiración real (ETR) de 37,127,955.8 m³ (equivalentes a 307.1 mm). Durante el período de estudio, las entradas de agua (precipitación y escorrentía) fueron superiores a las salidas de agua (evapotranspiración y escorrentía) en la subcuenca. El cálculo de volumen almacenado en los lagos disminuye de octubre de 2014 a marzo de 2015, se estima una variación de -330,722.12 m³ entre ambos meses. Finalmente, se estima un caudal subterráneo de 81,566,107.2 m³ (equivalente a 5.2 m³/s).

Tabla 5.13 Balance hidrológico para la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie.

Variables a escala mensual							
Fecha	P (m³)	ETR(m³)	Q entrada (m³)	Q salida (m³)	E (m³)	S (m³)	V (m³)
oct-14	38,281,988.8	8,213,036.5	23,534,431.8	11,720,309.2	61,816,420.5	19,933,345.7	40,672,373.9
nov-14	18,089,025.6	5,807,654.6	8,703,166.8	9,506,575.5	26,792,192.5	15,314,230.2	-
dic-14	10,519,687.4	5,500,237.1	8,707,667.7	8,792,764.5	19,227,355	14,293,001.6	-
ene-15	22,369,450.2	5,169,043.8	8,505,382.9	8,652,666.6	30,874,833.1	13,821,710.4	-
feb-15	9,358,894.3	5,121,277	6,908,090.3	7,057,473.7	16,266,984.6	12,178,750.7	-
mar-15	9,721,642.1	7,316,706.8	6,918,376.1	7,524,673.6	16,640,018.2	14,841,380.4	40,341,651.8

Balance Hidrológico					
P (m³)	ETR(m³)	Q entra(m³)	Q salida (m³)	ΔV (m³)	Q sub (m³)
108,340,688.4	37,127,955.8	63,277,115.6	53,254,463.1	-330,722.1	81,566,107.2

Nota. P= precipitación, ETR = evapotranspiración real, Q_{entrada} = escurrimiento superficial que entra al sistema lacustre, Q_{salida} = escurrimiento superficial que sale del sistema lacustre, E= entradas, S= salidas, V= volumen de agua en los lagos, ΔV = diferencia de volumen de agua en los lagos, Q_{sub} = escurrimiento subterráneo.

En la Figura 5.9 se compara la evapotranspiración real con la precipitación a escala mensual. Se observa que, durante el período de estudio, se tienen valores mensuales de evapotranspiración real (ETR) bajos y valores de precipitación altos, por lo tanto, las variaciones de ETR que presenta el período relativamente seco (diciembre a marzo), no son significativas. Los resultados indican que incluso durante los meses de menor precipitación, el sitio de interés no presenta pérdida de humedad en el suelo, es decir, no se tiene déficit hídrico que pueda afectar el desarrollo de la agricultura. El período de exceso hídrico se debe a las características locales de los factores climáticos y fisiográficos.

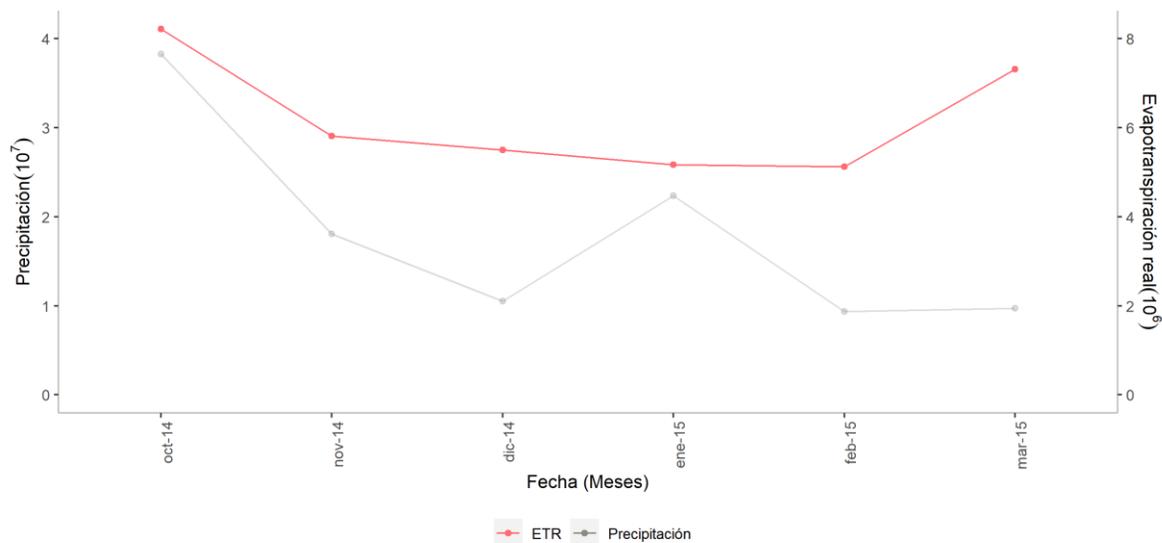


Figura 5.9 Relación entre precipitación con respecto a la evapotranspiración real. Nota. La línea roja representa la ETR (evapotranspiración real). La línea gris representa la precipitación media.

La Figura 5.10 compara precipitación acumulada y caudal medio superficial a escala mensual. El análisis evidencia las variaciones entre entrada (el Carrizal) y salida (Paso del Soldado) del caudal superficial. Al comparar las estimaciones de caudal con la precipitación, se observa que la distribución de los caudales y la precipitación es similar, presentando el pico máximo durante el mes de octubre y el valor mínimo durante el mes de febrero. Es importante resaltar que, durante el período de estudio, el caudal que sale del sistema lacustre es superior al caudal que entra al sistema, con excepción de octubre. El segundo pico máximo de precipitación se observa en enero, sin embargo, no se ve reflejado en un aumento del caudal, además no se aprecian variaciones significativas entre la entrada y salida de escurrimiento superficial durante los meses de diciembre a febrero.

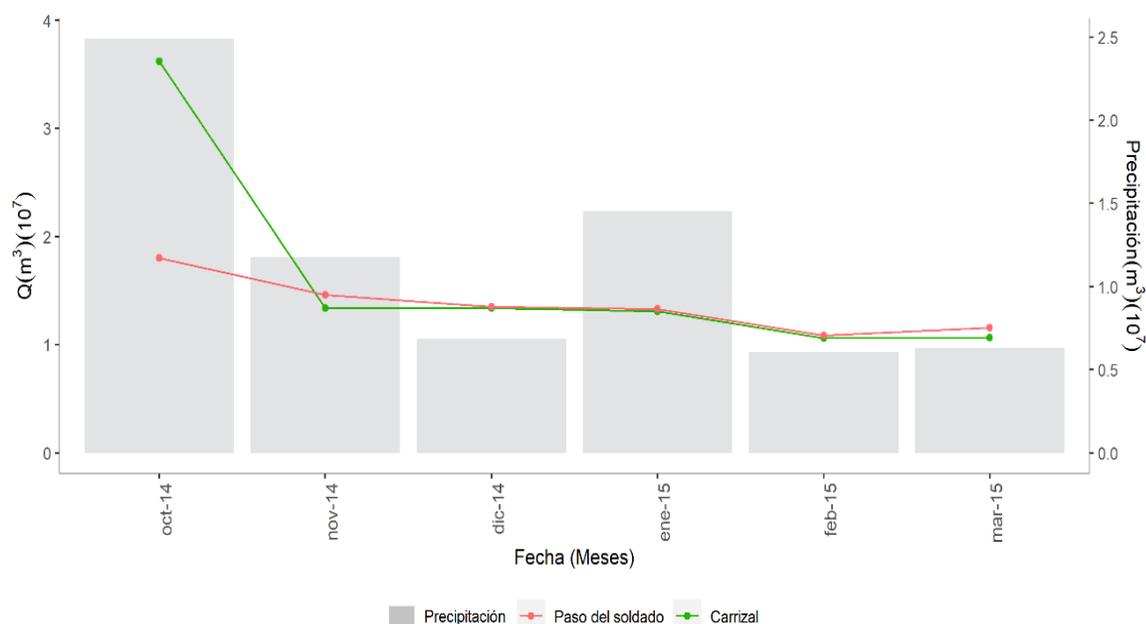


Figura 5.10 Balance hidrológico para octubre de 2014 a marzo de 2015. Nota. La línea verde representa el caudal superficial en el sitio de monitoreo El Carrizal, (entrada). La línea roja representa el caudal superficial en el sitio de monitoreo Paso de Soldado (salida). Las barras grises corresponden a la precipitación media.

5.4 Estimación de caudal superficial por el método racional

A continuación, se presentan los resultados estimados de caudal máximo mensual y anual a partir del método racional con datos de lluvia registrados en la estación meteorológica y CHIRPS para un año hidrológico octubre de 2014 a septiembre de 2015.

La primera variable estimada fue el coeficiente de escurrimiento (C_e) mensual y anual, de acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015. Como se mencionó en la metodología, se calculó un factor $K = 0.26$ a partir de los nueve sectores identificados de acuerdo con los diferentes usos de suelo y vegetación de la zona de estudio (ver Figura 5.9 y Tabla 5.14).

Tabla 5.14 Estimación del factor K a partir del uso de suelo y vegetación de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Descripción	Área (m ²)	K	K*A
Bosque	2,708,013.62	0.24	649,923.2697
Pastizal	2,594,254.15	0.3	778,276.2437
Agricultura de riego anual	1,753,547.06	0.3	526,064.1184
Agricultura de riego permanente	4,452,977.02	0.3	1,335,893.107
Agricultura de temporal anual	40,000,189.4	0.3	12,000,056.81
Vegetación secundaria arbustiva, galería y arbórea	60,080,150.7	0.26	15,620,839.17
Popal	832,028.432	0	0
Urbano construido	3,168,048.79	0.32	1,013,775.613

Descripción	Área (m ²)	K	K*A
Agua	5,273,297.33	0	0
Total	120,862,506		31,924,828.33

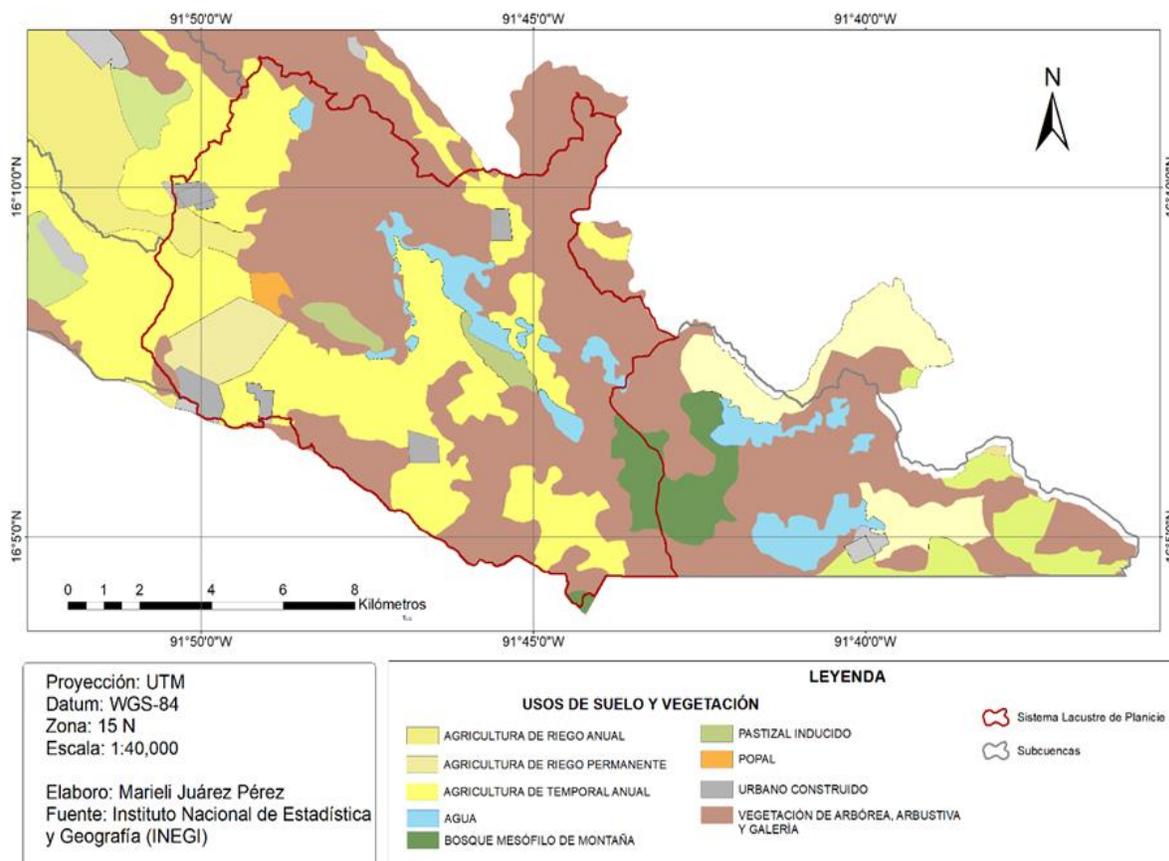


Figura 5.9 Mapa de uso de suelo y vegetación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

El valor de C_e mensual estimado con datos *in situ*, varió entre 0.05 a 0.1 a lo largo del período de estudio (ver Anexo IV), además se estimó un C_e anual de 0.3. A partir de los datos de precipitación registrados por CHIRPS ajustado, se calculan los valores mensuales de C_e , los cuales varían entre 0.04 a 0.2 durante todo el período de estudio (ver Anexo IV). Además, se determinó el C_e anual de 0.5 (Tabla 5.15).

Tabla 5.15 Valores anuales estimados para el coeficiente de escurrimiento (Ce) en la subcuenca de estudio a partir de valores de precipitación registrados en las estaciones.

Variable	Estación meteorológica Lagunas de Montebello	CHIRPS ajustado
Precipitación acumulada anual (mm)	1,832.2	3,700.5
Ce	0.3	0.5

Para el cálculo del caudal, se estima la intensidad a partir de las curvas I-D-F obtenidas para la estación Lagunas de Montebello y CHIRPS ajustado con datos de precipitación registrados durante nueve años. Además, se estimó la longitud del cauce principal igual a 14.5 km y una pendiente de cauce inferior a uno, indicando que nos encontramos en una planicie con poca inclinación. Se estimó una intensidad 11.2 mm/h para la estación y de 6.7 mm/h para CHIRPS, con una duración de 224.4 minutos (3.74 h) y un período de retorno de un año (Tabla 5.16 y Anexo IV).

Las intensidades varían con respecto a los datos de precipitación, para la estación *in situ* se estima una intensidad de 11.2 mm/h y para CHIRPS de 6.7 mm/h. Además, se calculó un área de 12091.5047 ha como área de drenaje. Para el caudal máximo anual se utilizan también los valores de Ce de la Tabla 5.15.

Tabla 5.16 Variables para el cálculo de la intensidad (mm/h) en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Parámetro	Estación	CHIRPS
Longitud del caudal principal (m)	14537.5	14537.5
Pendiente	0.006	0.006
Tiempo de concentración (min)	224.4	224.4
Ecuación I-D-F	$I = \frac{306.573 * T^{0.098}}{D^{0.612}}$	$I = \frac{187.231 * T^{0.211}}{D^{0.616}}$

Con base en los datos de precipitación *in situ* se estima un caudal máximo anual de 106.9 m³/s y de 119.7 m³/s con datos CHIRPS. En la Tabla 5.17, se observan los caudales máximos mensuales estimados para ambos productos. Al comparar los resultados obtenidos se observa un caudal máximo durante el mes de septiembre para el producto *in situ* y CHIRPS con valores de 32.3 m³/S y 82.5 m³/s respectivamente, el mes de septiembre es el más húmedo en la zona, con 325.8 mm registrados por la estación meteorológica. Durante el mes de abril se estima el caudal más bajo con 17.4 m³/s (*in situ*) y 9.82 m³/s (píxel), además de ser el mes menos húmedo durante el período de estudio, con una precipitación registrada por la estación de 24.8 mm.

Los caudales máximos estimados con datos CHIRPS ajustados durante la época de lluvias (junio a noviembre) y secas (diciembre a mayo) difieren a los caudales estimados con datos *in situ*, porque durante la época de lluvias CHIRPS ajustado estima valores de caudal máximo superiores (con excepción de noviembre y junio) e inferiores durante la época seca.

Tabla 5.17 Comparación de caudales máximos mensuales (m^3/s) estimados con el método racional en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Fecha	Q (m^3/s)	
	Estación	Simulado
oct-14	31.8	32.1
nov-14	23.6	13.2
dic-14	20.5	11.2
ene-15	25.3	10.5
feb-15	20	10.7
mar-15	20.1	11.7
abr-15	17.4	9.8
may-15	17.9	9.9
jun-15	20.6	10.3
jul-15	28.8	34.1
ago-15	26.3	22.9
sep-15	32.3	49.4
Media	23.7	18.8
Min	17.4	9.8
Max	32.3	49.4

Nota. Estación = estimación de caudal a partir de los datos de precipitación mensual de la estación meteorológica Lagunas de Montebello. Simulado = estimación de caudal a partir de los datos de precipitación mensual de CHIRPS ajustado.

En la Tabla 5.18 se muestran los caudales estimados a partir del método racional y área-velocidad. Se comparan los caudales estimados en la subcuenca con los dos métodos para un período de nueve meses (ver Figura 5.10), se aprecia que los caudales estimados a partir del método racional presentan valores superiores a los estimados con el método área-velocidad.

Para conocer la eficiencia de la estimación de los caudales máximos estimados con el método racional se calcula R^2 , MAE, r y RMSE con respecto al caudal máximo estimado en el sitio Paso del Soldado (descarga de la subcuenca). Se estimó para los caudales máximos calculados con datos la estación meteorológica (precipitación *in situ*) una regresión de 0.6 y un error absoluto medio (MAE) de $18.5 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que los valores de caudal máximo estimados con datos CHIRPS ajustado (píxel) presentan un $R^2 = 0.5$ y un MAE= $9.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Los valores anteriores indican que los datos obtenidos con el método racional presentan un ajuste bueno con respecto al método área-velocidad, sin embargo, la diferencia entre los valores estimados y los valores observados es amplia.

Tabla 5.18 Comparación de caudales máximos mensuales (m^3/s) estimados a partir de los métodos racional y área – velocidad en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Fecha	Método Racional		Método área-velocidad	
	Estación	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q (m^3/s)
		CHIRPS Ajustado	Paso del Soldado	El Carrizal
oct-14	31.45	32.06	4.71	36.13
nov-14	23.28	13.18	4.45	6.49
dic-14	20.21	11.23	3.66	5.57
ene-15	25.01	10.52	3.56	5.43
feb-15	19.74	10.71	3.13	4.91
mar-15	19.89	11.68	3.02	4.65
abr-15	17.17	9.82	2.76	2.55
may-15	17.66	9.89	2.66	5.25
jun-15	20.33	10.30	2.26	5.94

Con respecto al análisis de correlación (r) se encontró que el método racional presenta una correlación positiva alta para *in situ* = 0.8 y píxel=0.7 (con $p<0.05$ en ambos casos). Los valores de caudal estimados con el método racional con respecto al método área-velocidad, presentan un desempeño insatisfactorio y el ajuste de los datos no es bueno de acuerdo con los valores calculados para RMSE con datos *in situ* = 18.9 y píxel= 21.6.

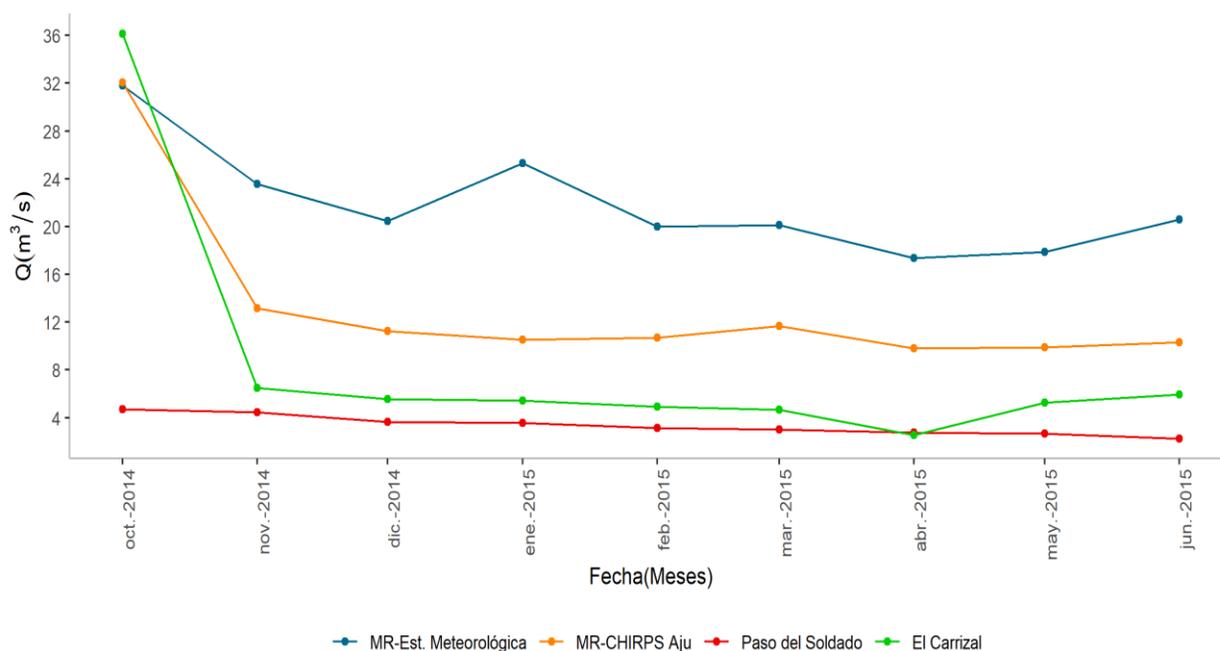


Figura 5.10 Comparación de caudales máximos superficiales estimados para subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Nota. MR-Est. Meteorológica= caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método racional a partir de valores de precipitación acumulada (mm) mensual registrados en la

estación Lagunas de Montebello. MR-CHIRPS Aju= caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método racional a partir de datos de precipitación acumulada (mm) mensual estimados con CHIRPS ajustado. El Carrizal= caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método área-velocidad en el sitio El carrizal. Paso del Soldado = caudal máximo (m^3/s) mensual estimado con el método área-velocidad en el sitio Paso del Soldado.

6. Discusión de resultados

6.1 Precipitación

Los datos meteorológicos de la estación Lagunas de Montebello se clasificaron en dos estaciones: húmeda o lluviosa (de junio a noviembre) y seca o cálida (de diciembre a marzo). Las temperaturas medias presentaron una variación aproximada de 5 °C en todo el período de estudio y una temperatura media anual de 17.7 °C. Además, se observan las variaciones temporales de precipitación descritas por CFE (2012) para la zona de Lagunas de Montebello. Las lluvias se presentan principalmente en verano, con registros de precipitación durante el invierno (Figura 5.2), además, se identifica al mes de septiembre (con 366.3 mm) como el más húmedo. Sin embargo, el análisis estadístico mostró que la correlación entre la temperatura del aire y la precipitación es despreciable ($r = 0.1$, $p > 0.05$).

6.1.1 Estimación de la precipitación con CHIRPS

Al sur de la cuenca sistema Río Grande de Comitán se ubica el PNLN, zona de interés nacional e internacional por sus abundantes recursos hidrológicos y riqueza biológica, sin embargo, la zona se caracteriza por ser una región con pocas estaciones meteorológicas (Figuroa-Gallegos, 2017). La baja disponibilidad de estaciones meteorológicas al sur de la cuenca dificulta el estudio de la precipitación, por lo tanto, se propone el estudio de métodos alternativos como la estimación remota de CHIRPS.

De acuerdo con el análisis comparativo previo de los datos estimados por CHIRPS y los observados de precipitación acumulada diaria, se aprecian diferencias en los registros de precipitación en ambos productos. Durante los meses de junio a noviembre, CHIRPS registra datos inferiores en comparación con la estación terrestre, los cuales incluso llegan a reportar valores extremos superiores a los 50 mm. Por lo tanto, CHIRPS tiene problemas para detectar lluvias intensas, generando subestimaciones con respecto a la estación. Sin embargo, a escala nacional se ha observado que CHIRPS sobrestima la precipitación de las estaciones de verano y otoño y subestima las estaciones de invierno y primavera (Perdigón-Morales, *et al.* 2017).

La diferencia entre CHIRPS y la estación meteorológica se amplía a escala mensual en comparación con la escala diaria. Lo anterior puede deberse a la falta de mediciones satelitales durante los meses de enero a marzo, i.e. la estación reporta en enero una precipitación de 80.8 mm, mientras que CHIRPS estima 6.6 mm. Además de la subestimación de datos durante los meses de agosto a noviembre, generando que el sesgo de error entre los valores CHIRPS con respecto a la estación sean más pronunciados en comparación a escala diaria. Los resultados anteriores contradicen lo reportado por Urrea *et al.* (2016) que describe que a mayor escala temporal las estimaciones de CHIRPS representa mejor la variabilidad temporal de la precipitación.

A partir del análisis de las métricas estadísticas se observa que CHIRPS presenta una fuerza de correlación despreciable ($p < 0.05$) a escala diaria y alta ($p < 0.05$) a escala mensual con respecto a las mediciones *in situ*, con valores insuficientes para NSE y valores altos para RMSE para ambas escalas temporales.

La variación observada en las estimaciones registradas entre ambas fuentes de información puede deberse a las características fisiográficas de la zona de estudio. La región se caracteriza por presentar clima templado y semicálido húmedo con precipitaciones abundantes durante el verano y con caída de precipitación durante otoño e invierno (Bahena, 2014; García, 2004; Figueroa-Gallegos, 2017), el relieve del terreno está formado por planicies, lomeríos, laderas de montaña y piedemonte (Durán, 2013) y al sur se ubica el PNLM conformado por bosque mesófilo de montaña que se caracteriza por nubosidad, neblina y humedad atmosférica alta durante todo el año (CONABIO, 2022). Las precipitaciones abundantes, principalmente en regiones con topografía compleja, son subestimadas por los productos satelitales (AghaKouchack *et al.* 2011; Derin y Yilmaz, 2014) debido principalmente a la dificultad en la medición y detección de los sensores pasivos como el IR para lluvia orográfica cálida frecuente en latitudes medias (Dinku *et al.* 2007, 2010; Ebert *et al.* 2007). Los sensores pasivos miden la temperatura en la cima de la nube y le asignan un valor de precipitación (Ebert *et al.* 2007).

6.1.2 Desempeño de CHIRPS ajustado para estimar la precipitación temporal y estacional

En este trabajo de investigación se ajusta la estimación de CHIRPS a partir del cálculo de sesgo diario y mensual con respecto a la estación meteorológica Lagunas de Montebello de CONAGUA. Posteriormente, se evaluó el desempeño de CHIRPS ajustado para estimar la variabilidad temporal de la precipitación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie a partir de la correlación de Pearson, NSE y RMSE.

Los datos de precipitación acumulada diaria medidos por el producto satelital presentan un sesgo local mayor a uno, indicando una sobreestimación de CHIRPS con respecto a las mediciones *in situ* (estación meteorológica). Sin embargo, el sesgo local estimado a partir de datos diarios es menor con respecto al mensual, cuyo valor es superior a cinco.

Con respecto al análisis de las pruebas estadísticas, se observa que a escala diaria la correlación entre CHIRPS ajustado y la estación es despreciable ($p < 0.05$), con valor negativo para NSE y valor superior a cero para RMSE, lo que significa que CHIRPS no es un buen predictor de la precipitación a escala diaria. Además, CHIRPS ajustado sigue subestimando las precipitaciones, por ejemplo, la precipitación máxima registrada en la estación es de 77.4 mm, mientras que CHIRPS ajustado estima el mismo día una precipitación de 41.3 mm. A escala mensual, CHIRPS ajustado presenta resultados satisfactorios al presentar una correlación alta ($p < 0.05$), pero insatisfactorios para NSE y RMSE. Sin embargo, durante los meses de junio a octubre, CHIRPS ajustado sobrestima la precipitación registrada en la estación.

Con respecto a variabilidad estacional de la precipitación, se observa que la época de lluvias está mejor ajustada con respecto a los datos *in situ* en comparación con la época de secas. Los valores obtenidos para cada métrica estadística indican una predicción ineficiente entre CHIRPS calibrado y los datos *in situ* para ambas épocas. Para la época húmeda a escala diaria y mensual, CHIRPS ajustado poseen una correlación moderada con valores insatisfactorios para NSE y RMSE. La época seca a escala diaria y mensual presenta correlación despreciable con valores insatisfactorios para NSE y RMSE.

Por lo tanto, CHIRPS ajustado subestima los valores diarios y sobrestima los valores mensuales y de acuerdo con las métricas estadísticas evaluadas, CHIRPS ajustado sigue sin mejorar la predicción temporal de la precipitación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Se ha reportado que el sesgo entre los productos satelitales y las estaciones terrestres puede reducirse si las estimaciones de precipitación se ajustan con respecto a los datos in situ mediante la eliminación del sesgo (Bedient, *et al.* 2008; Robles-Morua *et al.* 2012; Steiner *et al.* 1999), sin embargo, el ajuste depende de la calidad (Steiner *et al.* 1999) y cantidad de los datos registrados por pluviómetros.

Cabe destacar que debido a que la subcuenca cuenta con únicamente una estación meteorológica (Figura 4.1), los resultados son representativos de la zona geográfica de donde proceden los registros, sin embargo, la mayoría de los trabajos que evalúan la estimación de precipitación de productos satelitales globales o cuasi globales, utilizan una red amplia de estaciones meteorológicas con áreas geográficas extensas (Dinku *et al.* 2007; 2008; 2010; Perdígón-Morales, 2017; Robles-Morua *et al.* 2012). Otro factor que podría generar errores en la estimación de lluvia es el algoritmo de calibración del modelo, que estima únicamente la precipitación líquida generando sobrestimaciones o subestimaciones en zonas montañosas (Derin y Yilmaz, 2014).

6.2 Caudal superficial por el método área-velocidad

Se midieron los caudales en el Río Grande de Comitán, mediante aforos por molinete en dos sitios ubicados en la entrada y descarga de la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie.

El caudal en el sitio El carrizal no se midió durante el período de estudio, sin embargo, para el sitio Paso del Soldado el caudal es de $3.92 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de mayo de 2014. Por lo tanto, no se logró estudiar las variaciones de caudal durante la época de lluvias y secas a partir de aforos.

Las curvas de calibración que se usaron para simular las variaciones temporales de área y radio hidráulico con respecto al tirante durante el período de estudio a partir de los aforos realizados en el sitio El Carrizal y Paso del Soldado se utilizaron para calibrar las mediciones de caudal mediante sensores. Para las curvas se determinó un coeficiente de regresión igual a 0.99, indicando que el modelo de simulación es adecuado para describir la relación entre las variaciones del tirante con respecto al área y el radio hidráulico durante la época de lluvias y secas.

Con respecto a la estimación de caudal promedio en el sitio El Carrizal mediante sensores de presión, se aprecia una disminución de caudal a lo largo del período de estudio. El caudal mínimo es de $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de abril de 2015, mientras que el caudal máximo se registró durante el mes de octubre de 2014 con $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el sitio Paso del Soldado, el caudal promedio estimado presenta variaciones entre $2 \text{ m}^3/\text{s}$ a $4 \text{ m}^3/\text{s}$ a lo largo del período de estudio, con un caudal máximo de $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el mes de octubre de 2014 y un caudal mínimo de $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en los meses de junio y diciembre de 2015.

Al comparar el caudal medio estimado en ambos ríos a escala estacional durante octubre de 2014 a junio de 2015, se observa que los valores máximos se registran durante octubre, esto puede deberse a un escurrimiento superficial producido por eventos de precipitación. De acuerdo con los

registros de precipitación en la estación meteorológica Lagunas de Montebello, el mes de octubre es el segundo mes más húmedo en la región (ver Tabla 5.2).

Además, se observa que durante la época de lluvias el caudal promedio en el sitio El Carrizal es de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que en Paso del Soldado es de $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la época seca no se observaron variaciones debido a que el caudal promedio es de $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en ambos sitios. Durante la época de lluvias la entrada de agua por escurrimiento es mayor a la descarga de agua en la subcuenca. Al respecto, Salguero (2018) indica que la temporada de lluvias genera un escurrimiento directo en el sitio El Carrizal, sin embargo, cuando la lluvia disminuye el caudal del río también disminuye, durante esta época el caudal proviene de los aportes del agua subterránea.

6.3 Balance hidrológico a escala subcuenca

De acuerdo con los valores estimados a partir del balance hídrico en la subcuenca durante el período de estudio se presentan problemas de déficit de agua en el suelo durante 2014, pero, únicamente en dos meses (abril y mayo). El mes de abril es el más seco en ambos años, teniendo el déficit de agua más alto con 42.7 mm en 2014, que no logra ser compensada por la reserva de agua en el suelo – en el primer metro de profundidad- como sí ocurre durante 2015. Los excedentes estimados coinciden con la época húmeda, es decir, con los meses de mayor precipitación. Los resultados muestran que la evapotranspiración real (ETR) es inferior a la evapotranspiración potencial (ETP) durante los meses de abril a mayo de 2014, los meses restantes la ETR es igual a la ETP (Tabla 5.12).

A partir del balance hidrológico realizado para octubre 2014 a marzo 2015 (Figura 6.1), se observa que las entradas de agua a la subcuenca disminuyen durante este período, se estima una disminución en la precipitación de $28,560,346.7 \text{ m}^3$. El escurrimiento superficial que entra al sistema lacustre presenta una disminución de $896,329.8 \text{ m}^3$, sin embargo, las entradas de agua a la subcuenca son mayores que las salidas de agua por evapotranspiración y escorrentía en la subcuenca.

Con respecto al volumen almacenado en los siete lagos estudiados, se aprecia una disminución de agua contenida de octubre a marzo de $330,722.1 \text{ m}^3$, lo anterior coincide con la disminución del caudal que entrada al sistema lacustre y con la disminución de precipitación registrada en la estación meteorológica. Las variaciones de volumen en los lagos se relacionan con las variaciones estacionales de la precipitación en la región, por la influencia de prácticas agrícolas y ganaderas que se desarrollan alrededor de los lagos ubicados al norte del PNLN, por ejemplo, San Lorenzo y a variaciones en la dinámica hidrológica superficial debido a los cambios de cubierta vegetal (Santillán, 2018).

En este trabajo se estimó una recarga por escurrimiento subterráneo al sistema lacustre de $81,566,107.2 \text{ m}^3$ durante la época seca. Debido a las características kársticas de la región, el agua subterránea ingresa al sistema lacustre por medio de una falla existente al N-NE (Figura 4.3) y a procesos de infiltración y percolación de subcuencas vecinas, ya que existen aportes secundarios de agua subterránea en diferentes zonas aledañas al sistema lacustre. Téllez (2022) estudio los

mecanismos que influyen en la entrada del flujo de agua en el lago San José, dicho lago recibe aportes a partir del flujo subterráneo somero en aluviones y de forma directa por medio de una falla inferida al S-SE del lago.

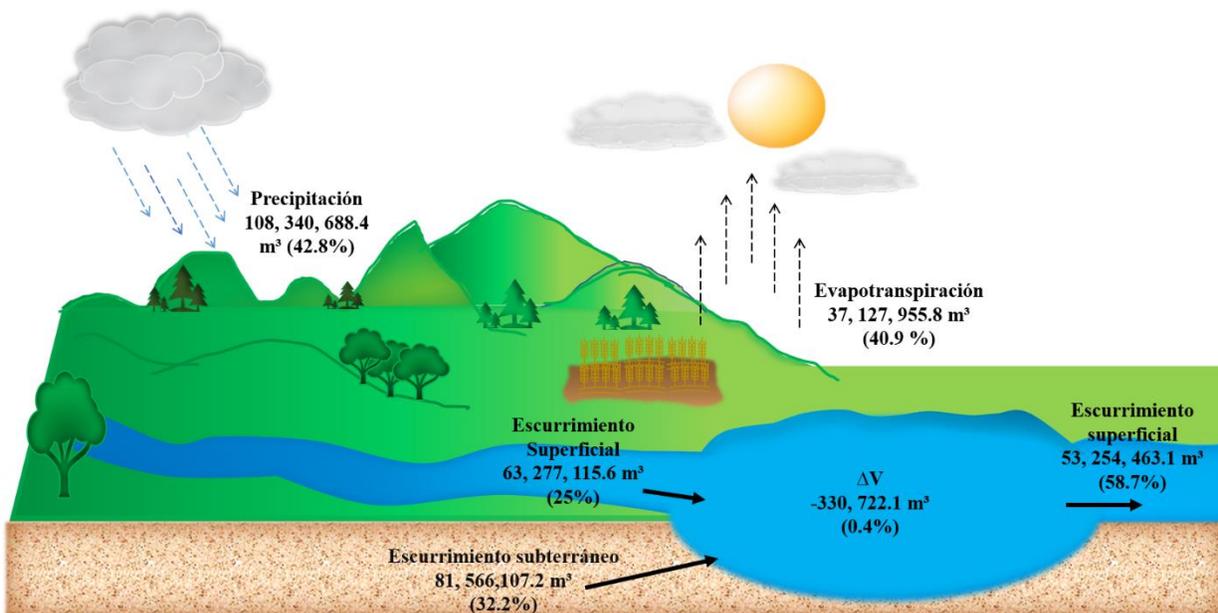


Figura 6.1 Diagrama del balance hidrológico de octubre 2014 a marzo 2015, estimación de entradas y salidas en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie. Nota. La orientación de las flechas indica la entrada y salida de agua de la subcuenca.

Además, los resultados indican que durante la época de secas el esguerrimiento subterráneo (32%) es mayor al esguerrimiento superficial (25%). Autores como Olea (2015) y Salguero (2018) han reportado que durante la época seca el flujo de agua subterránea descarga en el sistema lacustre de Montebello y que el flujo total del Río Grande de Comitán corresponde únicamente al aporte de agua subterránea, no obstante, la relación río - acuífero presenta una variación estacional. Durante la época húmeda, Salguero (2018) observó que el flujo subterráneo representaba una tercera parte del flujo total del río Grande de Comitán. Sin embargo, la relación río-acuífero en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie no pudo ser estudiada estacional y temporalmente por no tener mediciones de esguerrimiento subterráneo ni registros de caudales para un año hidrológico.

Para el cierre de balance hidrológico se consideraron como entradas de agua al sistema lacustre: la precipitación, el esguerrimiento superficial y subterráneo, obteniendo un aporte total de 253,183,911.2 m³, en cambio, el esguerrimiento superficial, la evapotranspiración real y el cambio de volumen en los lagos corresponden a las salidas de agua, cuyo volumen estimado fue de 90,713,141 m³. La discrepancia estimada es de 162,470,770.2 m³, obteniendo un error de 64% con respecto a la variable de mayor magnitud.

Cabe mencionar que este trabajo se enfocó en identificar las principales variables que influyen en la dinámica hidrológica de la subcuenca, a partir de la información disponible. Sin embargo, siempre existirán variaciones meteorológicas e hidrológicas temporales y estacionales en la zona

que debido a las características kársticas de la región que generan cambios en la dinámica hidrológica de la subcuenca. Al inferir variables como la evapotranspiración y el escurrimiento subterráneo, se podría estar generando subestimaciones o sobrestimaciones que influyen directamente el cierre del balance hidrológico.

6.4 Caudal superficial por el método racional

Se estimó el caudal máximo mensual en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, ubicada al sur de la cuenca Río Grande de Comitán, abarca una superficie de aproximadamente 120,915,947 m² y comprende parte de los municipios la Independencia y La Trinitaria, abarcando el 20.7% y el 79.3% respectivamente.

Para el cálculo de caudales máximos se estimó una intensidad de 11.2 mm/h y 6.7 mm/h para la estación meteorológica (*in situ*) y CHIRPS ajustado (píxel) respectivamente. Los valores del coeficiente de escurrimiento mensuales para la estación varían entre 0.05 a 0.1 y de 0.04 a 0.2 para CHIRPS. Para la estación se estimó un C_e anual de 0.3 mientras que para CHIRPS es de 0.5, indicando un error absoluto de 66.7%.

Con respecto a los caudales máximos mensuales se observa que durante la época de lluvias los caudales estimados con CHIRPS ajustado son superiores a los caudales estimados por la estación, sin embargo, durante la época de secas los caudales estimados son inferiores a los caudales obtenidos a partir de datos *in situ*. Las sobrestimaciones y subestimaciones de caudal entre ambos productos se deben a la variabilidad estacional de la precipitación estimada por CHIRPS ajustado. Durante la época de lluvias CHIRPS ajustado sobrestima la precipitación mensual, mientras que la época seca subestima los valores de precipitación mensual registrados en la estación meteorológica, dichas variaciones influyen directamente en la estimación temporal del caudal máximo.

Con base en los datos de precipitación anual *in situ* se estima un caudal máximo anual de 106.86 m³/s y de 119.67 m³/s para datos registrados en CHIRPS ajustado. Al comparar los resultados se obtiene un error relativo de 5.7%, indicando que CHIRPS sobrestima el caudal máximo que escurre en la subcuenca.

Al comparar los caudales máximos mensuales estimados a partir de los métodos área-velocidad y racional, se puede apreciar que este último sobrestima los valores del caudal a lo largo del período de estudio, aunque CHIRPS ajustado representa mejor la variabilidad estacional del cauce del río. Sin embargo, a partir del análisis estadístico, se obtuvo una correlación alta de 0.8 para la estación con un MAE igual a 9.9 m³/s y 0.7 para CHIRPS ($p < 0.05$ para ambos productos). Los valores para RMSE fueron insatisfactorios, indicando que los valores simulados -a partir del método racional- no se ajustan a los valores obtenidos con el método área-velocidad. Las diferencias entre los caudales máximos mensuales estimados por ambos métodos pueden deberse a las variaciones de caudal del río Grande de Comitán a lo largo del año como consecuencia de la demanda de agua, las actividades productivas y la relación río - acuífero.

La demanda de agua puede generar variaciones temporales que no son consideradas por el método racional, generando discrepancias en la estimación de volumen al comparar los resultados con el método área-velocidad. Durante la época seca, Salguero (2018) observó que los caudales medios y bajos a lo largo del recorrido del cauce Río Grande de Comitán se deben principalmente a la extracción de agua para uso humano, incluyendo el consumo y uso para el desarrollo de actividades económicas. De acuerdo con la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) al uso agrícola se le destina el 62.29%, al pecuario el 17.95% y al público urbano el 19.76% de 3,096,233.48 m³ anuales de agua concesionados en el municipio La Trinitaria, mientras que en el municipio La Independencia, el uso de agua por la actividad agrícola representa el 94.4% de 4,334,515.8 m³ anuales concesionados, sin embargo, existe un sector agrícola que utiliza el agua del río Grande de Comitán para el riego de cultivos, que no encuentra registrado en la REPDA (CONAGUA, 2009).

La actividad agrícola es una de las principales fuentes de ingresos en los municipios La Independencia y La Trinitaria, representando el 85.79% y el 80.22% respectivamente, para ambos municipios los cultivos más importantes son el maíz y el frijol. Sin embargo, en algunas localidades pertenecientes al municipio de La Trinitaria la siembra de jitomate ha aumentado en los últimos años, dicha actividad se realiza bajo el sistema de riego abastecido por pozos profundos, norias y la corriente del Río Grande de Comitán (CONAGUA, 2009). La agricultura de temporal es la principal actividad primaria que se desarrolla en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, ocupando el 86.6% de la superficie total perteneciente a la actividad agrícola en la región (ver Figura 6.2).

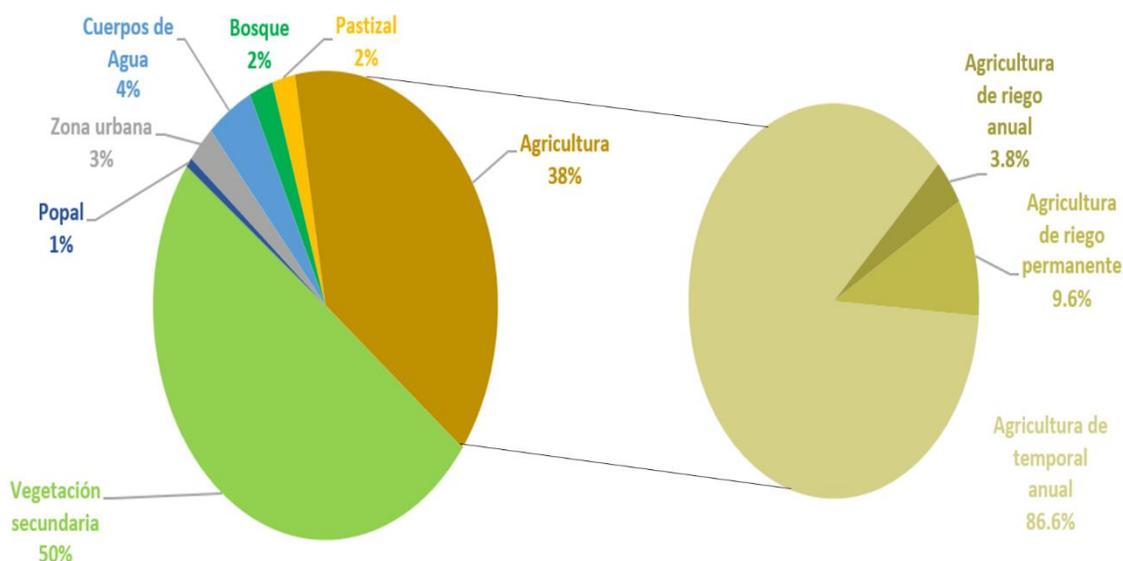


Figura 6.2 Gráfica del uso de suelo y vegetación en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2016).

En las regiones kársticas la relación del flujo superficial y subterráneo ocurre a través de fracturas y fallas generadas por procesos tectónicos y conductos desarrollados por procesos de karstificación o microporos que se desarrollan en la roca carbonatada (Hartmann *et al.*, 2014, Olea, 2015; Salguero, 2018), dichos procesos no están relacionados con el tamaño de la subcuenca, por lo tanto, el escurrimiento superficial dependerá de la geomorfología de la subcuenca y la cobertura del suelo.

Por las razones anteriormente mencionadas y por los resultados obtenidos, se considera que las estimaciones de caudal máximo mensual y anual con el método área-velocidad son más confiables para el estudio de la variación temporal del caudal en el Río Grande de Comitán.

7. Conclusiones

De acuerdo con el análisis, CHIRPS subestima las precipitaciones durante los meses de junio a noviembre (época de lluvias) y de diciembre a mayo (época seca) con respecto a las mediciones *in situ*.

A partir del análisis estadístico para CHIRPS ajustado se puede afirmar que el producto no es una opción viable para el estudio de la variabilidad estacional y temporal de la precipitación en la zona de estudio porque presenta variaciones significativas con respecto a las mediciones *in situ*.

Las características geomorfológicas (fallas, laderas de montaña y piedemonte), geología (suelos arcillosos y rocas kársticas), climáticas (precipitación y temperatura) y vegetación y usos de suelo (bosque mesófilo y agricultura) afectan directa al volumen de agua que escurre superficialmente en la subcuenca.

De acuerdo con el método área-velocidad y las mediciones de caudal con sensores de presión, se identifica al mes de octubre como la época de mayor escurrimiento superficial, mientras que los valores mínimos se estiman para el mes de abril.

La implementación de estaciones de monitoreo diario en caudales permite cuantificar las variaciones temporales que presenta el escurrimiento superficial, brindando información esencial para la gestión de recursos hídricos disponibles en la subcuenca.

Se estima que el caudal subterráneo aporta el 32.2 % de agua al sistema lacustre durante la época seca, llegando a superar la entrada de agua por escurrimiento superficial (25%), sin embargo, no se puede estimar la cantidad de agua que se infiltra al subsuelo.

El balance hidrológico para la época seca ha demostrado que las entradas de agua (precipitación, escurrimiento superficial y subterráneo) al sistema lacustre son superiores a las salidas de agua (por evapotranspiración y escurrimiento superficial).

Los caudales máximos mensuales estimados a partir de la precipitación *in situ* y CHIRPS con el método racional, se observó que el caudal estimado con CHIRPS subestima los caudales para los meses de enero a mayo, pero sobrestima los caudales de junio a noviembre en comparación al caudal estimado con datos *in situ*.

Las variaciones entre los caudales máximos mensuales estimados a partir de los métodos área-velocidad y racional, indican que el método racional no describe la variabilidad espacial y temporal del cauce principal. Lo anterior podría deberse al desarrollo de la actividad agrícola, lo que provoca variaciones en el caudal a lo largo del año que el método racional no considera.

7.1 Sugerencias y recomendaciones

En el presente trabajo se realizó un estudio acerca de la dinámica hidrológica en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie en Chiapas. Sin embargo, la cantidad de información utilizada

durante la investigación podría ampliarse y aplicarse a otras cuencas y subcuencas de México (con poca disponibilidad de datos), al considerar las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda ampliar el período temporal de estudio a fin de obtener más información para realizar la calibración de datos satelitales y completar series de datos faltantes de años previos o posteriores dentro de la zona de estudio.
- Comparar los resultados hallados con otras metodologías de calibración e incluso con otros productos satelitales de precipitación.
- Plantear la metodología propuesta a escala cuenca para ampliar las estaciones meteorológicas de estudio a fin de calcular un sesgo de campo (\bar{B}) que permita calibrar el modelo para diferentes sitios de estudio.
- El balance hidrológico estimado en el presente trabajo es menor a un año hidrológico, debido a la cantidad de información disponible, por lo tanto, se recomienda ampliar el período de estudio para el escurrimiento superficial. Existen otras variables como el escurrimiento subterráneo (recargas y descargas de acuíferos) que también deberían medirse en el área de estudio.
- Para comprender mejor el comportamiento temporal del escurrimiento superficial en la zona de estudio es necesario implementar estaciones hidrométricas automáticas. Otra opción más viable es utilizar modelos de simulación de caudales a partir de software HEC-RAS o HEC-HMS, este último incluye el estudio de datos meteorológicos para simular procesos de lluvia-escurrimiento.

8. Referencias

- AghaKouchak, A., A. Behrangi, S. Sorooshian, K. Hsu, and E. Amitai (2011), Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation rates across the central United States, *J. Geophys. Res.*, 116, D02115, doi:10.1029/2010JD014741.
- Alcocer, J., Oseguera, L. A., Sánchez, G., González, C. G., Martínez, J. R., & González, R. (2016). Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello Lakes, Chiapas. *Journal of Limnology*, 75(s1). <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1343>
- Alvarado Velázquez, J. (2015). *Evaluación espacial de la contaminación potencial puntual y difusa en la cuenca Río Grande de Comitán, Chiapas* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alvarado Velázquez, J. (2017). *Evaluación del transporte de sedimentos y la calidad del agua, utilizando SWAT, en el Río Grande de Comitán, Chiapas* [Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30663.80802>
- Alvarado Velázquez, J., García-Meneses, P. M., Esse, C., Saavedra, P., Morales Trosino, R., Bonifáz Alfonso, R., & Mazari-Hiriart, M. (2022). Spatially explicit vulnerability analysis of contaminant sources in a karstic watershed in southeastern Mexico. *Applied Geography*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102606>
- Aparicio Mijares, F. Javier. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Noriega.
- Arellano Contreras, U. y Jiménez Salgado, E. (2012). Evaluación geológico-estructural del complejo volcánico Chichonal, Chiapas, como fuente alterna de energía. *Geotermia*, 25(2). <https://biblat.unam.mx/hevila/Geotermia/2012/vol25/no2/1.pdf>
- Ávila García, D. (2019). *Conservación de los lagos de Montebello. Un esfuerzo entre sociedad, gobierno y academia* (1a. edición). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bahena-Bahena, J. (2014). *Cartografía Temática de la Cuenca Hidrográfica del Sistema Lagunar Montebello, Chiapas* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de Guerrero.
- Bedient, P. B., Huber, W. Charles., & Vieux, B. E. (2013). *Hydrology and floodplain analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Boushaki, F. I., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Park, G. H., Mahani, S., & Shi, W. (2009). Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based measurement: A case study evaluation over the southwestern United States. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5), 1231–1242. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1099.1>
- Braithwaite, J. O. (2008). *Evaluación de técnicas y Métodos para aforar canales* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2149/braithwaitejermaine.pdf?sequence=1>

- Breña, A. y Jacobo M. (2006). *Principios y fundamentos de hidrología superficial* (1.^a ed.). Universidad Autónoma Metropolitana.
https://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf
- Camargo Hernández, J. y Franco, V. (n.d.). *Hidráulica de canales*. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Campos Aranda, D. F. y Gómez De Luna, R. (1990). Procedimiento para obtener curvas a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería hidráulica En México*, 5(2), 39–52.
<http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/636>
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo hidrológico* (3era. reimpresión) Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Chuvieco, E. (1995). Sistemas espaciales de teledatación. En *Fundamentos de Teledetección Espacial* (2^a ed., pp. 97–115). Ediciones RIALP, S. A.
<http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTO S-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2012). *Estudio para conocer la calidad del agua de las Lagunas de Montebello, Chiapas (Primera etapa: Diagnóstico)*. Tomo I: Hidrometeorología. Caracterización climatológica, meteorológica e hidrográfica.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2008). *Estadística del agua en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009). *Plan de Gestión de la Cuenca Río Grande-Lagunas de Montebello*.
http://transparencia.comitan.gob.mx/ART74/I/ECOLOGIA/plan_de_Gestion_de_la_Cuenca_Rio_Grande_Lagunas_de_Montebello.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2014). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99961/PMPMS_CC_R_os_Grijalva_y_Usumacinta.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015*, Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación.
<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/NOM-011-CONAGUA-2015.pdf>

- CONANP-SEMARNAT. (2007). *Programa de conservación y manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2022). Ecosistemas de México. Bosques nublados. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueNublado>
- Cotler Ávalos, H., Galindo Alcántar, A., González Mora, I., Pineda López, R. y Ríos Patrón, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión* (1^a ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Derin, Y., & Yilmaz, K. K. (2014). Evaluation of multiple satellite-based precipitation products over complex topography. *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1498–1516. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0191.1>
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press, INC. Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S., & Ropelewski, C. (2007). Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1503–1526. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>
- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S., & Ropelewski, C. (2007). Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1503–1526. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>
- Dinku, T., Chidzambwa, S., Ceccato, P., Connor, S., & Ropelewski, C. (2008). Validation of high-resolution satellite rainfall products over complex terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4097–4110. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160701772526>
- Dinku, T., Connor, S. J., & Ceccato, P. (2010). *Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America*. In *Satellite Rainfall applications for surface hydrology* (pp. 193–204). Springer. Doi: 10.1007/978-90-481-2915-7_11
- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 292–312. <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2002). Capítulo 8. Erosión de suelos. En *Mecánica de suelos* (pp. 68–79). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3375>
- Durán Calderón, J. L. (2013). *Análisis Geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas* [Ingeniería]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fernández Pérez C. (2011). Análisis de metodologías para determinar escurrimientos naturales en sitios no aforados de una cuenca hidrológica instrumentada. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).

- Figuroa-Gallegos, J. A. (noviembre-diciembre, 2017). Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 137-143, doi:10.24850/j-tyca-2017-06-10
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelson, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Series de libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I. y Besteiro, S. I. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas Libros de Cátedra* (1ª ed.). Editorial de la Universidad de La Plata. www.editorial.unlp.edu.ar
- González del Castillo, E. C. (2003). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)*. Ramsar. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1325RIS.pdf>
- Guzmán- Speziale, M., & Meneses-Rocha, J. J. (2000). The North America–Caribbean plate boundary west of the Motagua–Polochoic fault system: A fault jog in Southeastern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(4), 459–468. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00036-5)
- Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., & Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 218–242. doi:10.1002/2013rg000443
- INEGI (2010). *Red Hidrográfica escala 1:50 000 Edición: 2.0, Subcuenca Hidrográfica RH30G1 R. Comitán/Cuenca R. Lacantún/R.H. Grijalva-Usumacinta*. [Topografía]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, CEM 3.0 Chiapas a 15m (CEM)*. Chiapas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E15d84 (El Triunfo) escala 1:50 000*. Serie III. [Topografía]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2017). *Conjunto de datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250 000*. Serie VI (Continuo Nacional). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2018). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E15d85 (Amparo Aguatinta) escala 1:50 000*. Serie III. [Topografía]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- International Research Institute for Climate and Society. (2015). *Factibilidad del uso de bases de datos climáticos para seguros de índice en América Latina*. https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2016/10/Latam_data_feas_es.pdf

- Irmak, S. (2008). Evapotranspiration. In S. E. Jorgensen & B. D. Fath (Eds.), *Encyclopedia of Ecology* (pp. 1432–1438). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00270-6>
- Juárez Hernández, E. L. (2014). Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande Comitán. [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2014/marzo/0710801/Index.html>
- Katul, G., & Novick, K. (2009). Evapotranspiration. In G. E. Likens (Ed.), *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 661–667). Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00012-0>
- Kennedy Pérez, A., Fragoza Díaz, F., Peña Peña, E. y Moreno Bañuelos, E. (1992). *Manual de Aforos* (1ª ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Martínez, A. M. (2015). *Caracterización de los suelos de la cuenca del Río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al sistema lagunar de Montebello, Chiapas* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendelsohn, R., Kurukulasuriya, P., Basist, A., Kogan, F., & Williams, C. (2007). Climate analysis with satellite versus weather station data. *Climatic Change*, 81(1), 71–83. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9139-x>
- Mora P., L., Bonifaz, R. y López-Martínez, R. (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 68, 377–394. https://www.researchgate.net/publication/313606330_Unidades_geomorfologicas_de_la_cuenca_del_Rio_Grande_de_Comitan_Lagos_de_Montebello_Chiapas-Mexico/citation/download
- Mota Covarrubias, S. (2019). *Análisis hidrogeoquímico del agua subterránea de la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2019/julio/0790914/Index.html>
- Olea-Olea, S. (2015). *Análisis del impacto de la actividad agrícola en el agua subterránea en la zona de la Trinitaria, Chiapas* [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordoñez Gálvez, J. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica? Cartilla técnica* (Z. Novoa Goicochea, Ed.; 1ª ed.). Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez J. (2011). *Cartilla Técnica: Balance Hídrico superficial*. Sociedad Geográfica de Lima. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). *De la medición a la información hidrológica. Guía de prácticas hidrológicas*. Volumen I Hidrología. N° 168. Sexta edición. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10038

- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre, S.L., Roldán, Q.J., Aranda, G.J.J., Morán, Z.D., Alaniz A.S. y Nieto, S.A. (1992). *Carta Geológica de la República Mexicana, 1:2000000: Washington, Williams & Heintz (Mapa)*, (pp. 78). Instituto de Geología, UNAM.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX* (1), 19–42.
[http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5901/\(3\)Padilla.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5901/(3)Padilla.pdf)
- Pastora F., D. (2010). *Evaluación de la Fórmula de Manning en el río Ostua* [Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pedroza González, E. (2017). *El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas* (1ª ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2185/IMTA_613.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Pérez, P. O., & Barrett, B. S. (2017). The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2174–2186.
 doi:10.1002/joc.5322
- Ramos Pérez, M. R. (2000). *Hidráulica de canales en régimen uniforme y régimen gradualmente variado con cálculo de remanso mediante tres programas de cómputo* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramsar (27 de noviembre de 2003). *Parque Nacional Lagunas de Montebello*.
<https://rsis.ramsar.org/es/ris/1325>
- Robles-Morua, A., Vivoni, E. R., & Mayer, A. S. (2012). Distributed hydrologic modeling in northwest Mexico reveals the links between runoff mechanisms and evapotranspiration. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), 785–807. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0112.1>
- Salguero Olvera, C. A. (2018). *Análisis del impacto del agua subterránea en el régimen de caudal ambiental en el Río Grande de Comitán, Chiapas, México*. [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2018/octubre/0781394/Index.html>
- Santillán Espinoza, L.E. (2018). Caracterización de cambios morfológicos a través de herramientas geoespaciales en el área lacustre de Montebello, Chiapas. [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://132.248.9.195/ptd2018/febrero/0770696/Index.html>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2021). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

- Smith, T. M., Arkin, P. A., Bates, J. J., & Huffman, G. J. (2006). Estimating Bias of Satellite-Based Precipitation Estimates. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), 841–856. https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/7/5/jhm524_1.xml
- Sokolov, A. Aleksandrovich y Chapman, T. Grandin (1974). *Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos*. Instituto de hidrología de España/UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000137771>
- Springall, R. (1970). *Hidrología*. Primera parte. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Steiner, M., Smith, J. A., Burges, S. J., Alonso, C. V., & Darden, R. W. (1999). Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation. *Water Resources Research*, 35(8), 2487–2503. <https://doi.org/10.1029/1999WR900142>
- Tamari, S. y Aguilar-Chávez, A. (2010). Probando transductores de presión sumergibles para monitorear el nivel del agua en tanques. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(3), 71–88. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Téllez Herrera, A. (2022). *Identificación de flujos de agua subterránea con el uso de la herramienta hidrogeoquímica, hacia el lago San José en los Lagos de Montebello, Chiapas*. [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2022/junio/0826818/Index.html>
- Toro-Guerrero, F., Kretschmar, T. y Hinojosa-Corona, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5(6), 69–81.
- Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2016, marzo). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú.
- USGS. (2022). *EarthExplore – Home*. United States Geological Service (USGS). Retrieved August 12th, From <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Walter K., Dodds. (2010). *Freshwater ecology: Concepts and environmental applications of limnology*. ProQuest Eboo

9. Anexos

Anexo I

Datos de precipitación acumulada diaria para la estimación del sesgo de campo (B)

Tabla 1. Precipitación acumulada diaria (mm) registrada por la estación meteorológica Lagunas de Montebello, producto satelital CHIRPS Y CHIRPS ajustado.

Precipitación Acumulada diaria (mm)					Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU	Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
01/01/2014	5.4	0	NaN	0	02/03/2014	0	0	NaN	0
02/01/2014	0.8	0	NaN	0	03/03/2014	0	0	NaN	0
03/01/2014	8	0	NaN	0	04/03/2014	0	0	NaN	0
04/01/2014	0.8	0	NaN	0	05/03/2014	0	0	NaN	0
05/01/2014	0.4	0	NaN	0	06/03/2014	0.4	0	NaN	0
06/01/2014	0	0	NaN	0	07/03/2014	0	0	NaN	0
07/01/2014	12.8	3.227	3.967	5.97	08/03/2014	0	0	NaN	0
08/01/2014	2.6	0	NaN	0	09/03/2014	4.4	16.945	0.260	9.17
09/01/2014	0	0	NaN	0	10/03/2014	4.2	0	NaN	0
10/01/2014	0.2	0	NaN	0	11/03/2014	0	0	NaN	0
11/01/2014	0	0	NaN	0	12/03/2014	0	0	NaN	0
12/01/2014	3.2	0	NaN	0	13/03/2014	1.4	0	NaN	0
13/01/2014	0.8	0	NaN	0	14/03/2014	1.4	0	NaN	0
14/01/2014	1.6	0	NaN	0	15/03/2014	0.4	0	NaN	0
15/01/2014	7	0	NaN	0	16/03/2014	0	0	NaN	0
16/01/2014	0	0	NaN	0	17/03/2014	0	0	NaN	0
17/01/2014	0	0	NaN	0	18/03/2014	0.6	0	NaN	0
18/01/2014	0.8	0	NaN	0	19/03/2014	0	0	NaN	0
19/01/2014	0.8	0	NaN	0	20/03/2014	0	0	NaN	0
20/01/2014	2.4	0	NaN	0	21/03/2014	7.2	0	NaN	0
21/01/2014	0	0	NaN	0	22/03/2014	0	0	NaN	0
22/01/2014	3.6	0	NaN	0	23/03/2014	0	0	NaN	0
23/01/2014	0.2	0	NaN	0	24/03/2014	0	0	NaN	0
24/01/2014	1.6	0	NaN	0	25/03/2014	0	0	NaN	0
25/01/2014	21.2	0	NaN	0	26/03/2014	1.8	0	NaN	0
26/01/2014	0.4	0	NaN	0	27/03/2014	0	0	NaN	0
27/01/2014	0	0	NaN	0	28/03/2014	0	0	NaN	0
28/01/2014	0	0	NaN	0	29/03/2014	0	0	NaN	0
29/01/2014	0	0	NaN	0	30/03/2014	0	0	NaN	0
30/01/2014	6	3.329	1.802	6.15	31/03/2014	0	0	NaN	0
31/01/2014	0.2	0	NaN	0	01/04/2014	0	0	NaN	0
01/02/2014	0	0	NaN	0	02/04/2014	0	0	NaN	0
02/02/2014	0	0	NaN	0	03/04/2014	0	0	NaN	0
03/02/2014	0	0	NaN	0	04/04/2014	0	6.145	NaN	3.32
04/02/2014	0	0	NaN	0	05/04/2014	8.6	0	NaN	0
05/02/2014	0	0	NaN	0	06/04/2014	0	0	NaN	0
06/02/2014	0.4	0	NaN	0	07/04/2014	0	0	NaN	0
07/02/2014	8.8	0	NaN	0	08/04/2014	4.6	0	NaN	0
08/02/2014	0	0	NaN	0	09/04/2014	2.4	0	NaN	0
09/02/2014	17.4	0	NaN	0	10/04/2014	0.4	0	NaN	0
10/02/2014	3.2	0	NaN	0	11/04/2014	0	0	NaN	0
11/02/2014	0	0	NaN	0	12/04/2014	0	0	NaN	0
12/02/2014	5.4	0	NaN	0	13/04/2014	0	0	NaN	0
13/02/2014	0.2	2.829	NaN	1.53	14/04/2014	0	0	NaN	0
14/02/2014	0	0	NaN	0	15/04/2014	1.4	0	NaN	0
15/02/2014	0	0	NaN	0	16/04/2014	10.4	0	NaN	0
16/02/2014	6.6	0	NaN	0	17/04/2014	0	0	NaN	0
17/02/2014	1	0	NaN	0	18/04/2014	0	2.112	NaN	1.14
18/02/2014	1	0	NaN	0	19/04/2014	6.4	0	NaN	0
19/02/2014	5.2	0	NaN	0	20/04/2014	0.6	0	NaN	0
20/02/2014	0	0	NaN	0	21/04/2014	0	0	NaN	0
21/02/2014	0	0	NaN	0	22/04/2014	0	0	NaN	0
22/02/2014	16	3.755	4.261	6.94	23/04/2014	0	4.869	NaN	2.63
23/02/2014	0	0	NaN	0	24/04/2014	0	0	NaN	0
24/02/2014	0	0	NaN	0	25/04/2014	0	0	NaN	0
25/02/2014	0	0	NaN	0	26/04/2014	0	0	NaN	0
26/02/2014	0	0	NaN	0	27/04/2014	0	0	NaN	0
27/02/2014	0	0	NaN	0	28/04/2014	0	0	NaN	0
28/02/2014	0.6	0	NaN	0	29/04/2014	0	0	NaN	0
01/03/2014	0	0	NaN	0	30/04/2014	0	0	NaN	0

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
01/05/2014	0	20.781	NaN	11.24
02/05/2014	5.4	0	NaN	0
03/05/2014	19.2	0	NaN	0
04/05/2014	2.2	10.391	0.212	5.62
05/05/2014	0.8	0	NaN	0
06/05/2014	0.4	0	NaN	0
07/05/2014	0	0	NaN	0
08/05/2014	0	12.639	NaN	6.84
09/05/2014	0	3.16	NaN	1.71
10/05/2014	5.8	0	NaN	0
11/05/2014	13.6	11.74	1.158	21.70
12/05/2014	1	2.935	0.341	1.59
13/05/2014	0.2	2.935	NaN	1.59
14/05/2014	0.4	2.935	NaN	1.59
15/05/2014	0.2	0	NaN	0
16/05/2014	0	0	NaN	0
17/05/2014	0.2	0	NaN	0
18/05/2014	0.2	6.08	NaN	3.29
19/05/2014	0.2	0	NaN	0
20/05/2014	0.2	0	NaN	0
21/05/2014	0.2	4.222	NaN	2.28
22/05/2014	0.4	4.222	NaN	2.28
23/05/2014	0.2	0	NaN	0
24/05/2014	0.2	4.222	NaN	2.28
25/05/2014	0.2	0	NaN	0
26/05/2014	0	0	NaN	0
27/05/2014	0.2	0	NaN	0
28/05/2014	0.2	5.932	NaN	3.21
29/05/2014	0.2	17.796	NaN	9.63
30/05/2014	0	17.796	NaN	9.63
31/05/2014	0.2	0	NaN	0
01/06/2014	0.2	4.08	NaN	2.21
02/06/2014	0.2	16.319	NaN	8.83
03/06/2014	5	32.637	0.153	17.65
04/06/2014	7.8	20.398	0.382	11.03
05/06/2014	16	4.08	3.922	7.54
06/06/2014	33.8	14.909	2.267	27.56
07/06/2014	4.4	0	NaN	0
08/06/2014	3.4	14.909	0.228	8.06
09/06/2014	18.6	22.363	0.832	12.10
10/06/2014	0.2	7.454	NaN	4.03
11/06/2014	12.2	3.683	3.313	6.81
12/06/2014	0.4	0	NaN	0
13/06/2014	2	14.733	0.136	7.97
14/06/2014	9.2	16.838	0.546	9.11
15/06/2014	10.4	0	NaN	0
16/06/2014	40.8	7.016	5.815	12.97
17/06/2014	31.6	7.016	4.504	12.97
18/06/2014	14.4	0	NaN	0
19/06/2014	13.2	0	NaN	0
20/06/2014	3.6	0	NaN	0
21/06/2014	0.4	0	NaN	0
22/06/2014	0.2	0	NaN	0
23/06/2014	2.4	36.548	0.066	19.77
24/06/2014	0.6	0	NaN	0
25/06/2014	0	0	NaN	0
26/06/2014	0	0	NaN	0
27/06/2014	0	0	NaN	0
28/06/2014	0	0	NaN	0
29/06/2014	4.8	0	NaN	0
30/06/2014	2.4	0	NaN	0
01/07/2014	1	3.456	0.289	1.87
02/07/2014	2.2	6.912	0.318	3.74
03/07/2014	0.4	6.912	NaN	3.74
04/07/2014	28.2	17.279	1.632	31.94
05/07/2014	3.6	3.456	1.042	6.39
06/07/2014	7.4	0	NaN	0
07/07/2014	2.4	10.296	0.233	5.57
08/07/2014	0	0	NaN	0
09/07/2014	1.8	0	NaN	0
10/07/2014	0.8	0	NaN	0
11/07/2014	0.2	0	NaN	0
12/07/2014	5.6	0	NaN	0

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
13/07/2014	5.6	3.199	1.751	5.91
14/07/2014	11.6	6.397	1.813	11.83
15/07/2014	4	0	NaN	0
16/07/2014	0	8.716	NaN	4.71
17/07/2014	0	0	NaN	0
18/07/2014	0	0	NaN	0
19/07/2014	0.4	0	NaN	0
20/07/2014	14	8.716	1.606	16.11
21/07/2014	2.4	0	NaN	0
22/07/2014	0	0	NaN	0
23/07/2014	3.6	6.253	0.576	3.38
24/07/2014	18.2	0	NaN	0
25/07/2014	2.8	0	NaN	0
26/07/2014	7.8	3.57	2.185	6.60
27/07/2014	2.8	0	NaN	0
28/07/2014	7.2	3.57	2.017	6.60
29/07/2014	52.2	3.57	14.622	6.60
30/07/2014	0.2	4.08	NaN	2.21
31/07/2014	0.2	0	NaN	0
01/08/2014	0	0	NaN	0
02/08/2014	0	0	NaN	0
03/08/2014	0	0	NaN	0
04/08/2014	0.4	0	NaN	0
05/08/2014	0	0	NaN	0
06/08/2014	2.4	0	NaN	0
07/08/2014	1.2	0	NaN	0
08/08/2014	0	0	NaN	0
09/08/2014	0.8	0	NaN	0
10/08/2014	7	12.66	0.553	6.85
11/08/2014	6	10.842	0.553	5.86
12/08/2014	0.4	5.421	NaN	2.93
13/08/2014	0.2	5.421	NaN	2.93
14/08/2014	1.6	0	NaN	0
15/08/2014	9.2	0	NaN	0
16/08/2014	12.8	0	NaN	0
17/08/2014	10.8	0	NaN	0
18/08/2014	0	3.881	NaN	2.10
19/08/2014	0	0	NaN	0
20/08/2014	0.4	0	NaN	0
21/08/2014	1.2	0	NaN	0
22/08/2014	0.4	0	NaN	0
23/08/2014	0	0	NaN	0
24/08/2014	14.8	0	NaN	0
25/08/2014	6	0	NaN	0
26/08/2014	2.2	0	NaN	0
27/08/2014	6.8	9.013	0.754	4.88
28/08/2014	40	9.013	4.438	16.66
29/08/2014	3.6	9.013	0.399	4.88
30/08/2014	13.6	18.025	0.755	9.75
31/08/2014	20	45.063	0.444	24.38
01/09/2014	10.8	13.77	0.784	7.45
02/09/2014	2	0	NaN	0
03/09/2014	1	13.77	0.073	7.45
04/09/2014	0	0	NaN	0
05/09/2014	6.4	0	NaN	0
06/09/2014	2	0	NaN	0
07/09/2014	33.6	11.066	3.036	20.46
08/09/2014	3.2	0	NaN	0
09/09/2014	6.8	11.066	0.614	5.99
10/09/2014	0.6	33.198	NaN	17.96
11/09/2014	36.4	20.797	1.750	38.45
12/09/2014	32.8	20.797	1.577	38.45
13/09/2014	23.8	5.199	4.578	9.61
14/09/2014	35.6	0	NaN	0
15/09/2014	14.6	15.597	0.936	8.44
16/09/2014	22.4	15.438	1.451	28.54
17/09/2014	0	7.719	NaN	4.18
18/09/2014	0	7.719	NaN	4.18
19/09/2014	2.6	7.719	0.337	4.18
20/09/2014	4	0	NaN	0
21/09/2014	13.2	19.875	0.664	10.75
22/09/2014	9.2	14.906	0.617	8.06
23/09/2014	1.6	4.969	0.322	2.69

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
24/09/2014	21.8	4.969	4.387	9.19
25/09/2014	55.6	4.969	11.189	9.19
26/09/2014	14.6	12.902	1.132	23.85
27/09/2014	10.8	25.804	0.419	13.96
28/09/2014	36.6	12.902	2.837	23.85
29/09/2014	2	25.804	0.078	13.96
30/09/2014	2.8	0	NaN	0
01/10/2014	2.6	0	NaN	0
02/10/2014	4	10.414	0.384	5.63
03/10/2014	0	0	NaN	0
04/10/2014	0	5.207	NaN	2.82
05/10/2014	0.4	0	NaN	0
06/10/2014	0	0	NaN	0
07/10/2014	0	0	NaN	0
08/10/2014	6	0	NaN	0
09/10/2014	36.6	7.492	4.885	13.85
10/10/2014	6.8	0	NaN	0
11/10/2014	13.8	0	NaN	0
12/10/2014	10.6	3.741	2.833	6.92
13/10/2014	3.6	0	NaN	0
14/10/2014	5	3.741	1.337	6.92
15/10/2014	58.2	11.222	5.186	20.75
16/10/2014	39.8	21.892	1.818	40.47
17/10/2014	0.2	0	NaN	0
18/10/2014	8.4	0	NaN	0
19/10/2014	15.6	0	NaN	0
20/10/2014	0.2	7.297	NaN	3.95
21/10/2014	0	0	NaN	0
22/10/2014	5	0	NaN	0
23/10/2014	1.2	41.682	0.029	22.55
24/10/2014	13.4	25.009	0.536	13.53
25/10/2014	7	0	NaN	0
26/10/2014	1.2	0	NaN	0
27/10/2014	0	0	NaN	0
28/10/2014	0	0	NaN	0
29/10/2014	15.4	0	NaN	0
30/10/2014	14	0	NaN	0
31/10/2014	47.6	0	NaN	0
01/11/2014	9.8	8.173	1.199	15.11
02/11/2014	0	0	NaN	0
03/11/2014	2.8	0	NaN	0
04/11/2014	1.2	0	NaN	0
05/11/2014	0.4	0	NaN	0
06/11/2014	1.4	0	NaN	0
07/11/2014	0.2	0	NaN	0
08/11/2014	0.6	0	NaN	0
09/11/2014	0.8	0	NaN	0
10/11/2014	0.4	0	NaN	0
11/11/2014	0	0	NaN	0
12/11/2014	0	0	NaN	0
13/11/2014	3.6	0	NaN	0
14/11/2014	12.6	0	NaN	0
15/11/2014	1.2	0	NaN	0
16/11/2014	0	0	NaN	0
17/11/2014	0	0	NaN	0
18/11/2014	2.6	0	NaN	0
19/11/2014	38.6	4.447	8.680	8.22
20/11/2014	24.4	0	NaN	0
21/11/2014	1.2	0	NaN	0
22/11/2014	0.6	0	NaN	0
23/11/2014	0	0	NaN	0
24/11/2014	0.2	0	NaN	0
25/11/2014	0	0	NaN	0
26/11/2014	9	8.946	1.006	16.54
27/11/2014	15.6	0	NaN	0
28/11/2014	16.4	0	NaN	0
29/11/2014	5	0	NaN	0
30/11/2014	1	0	NaN	0
01/12/2014	3.4	0	NaN	0
02/12/2014	24	6.362	3.772	11.76
03/12/2014	1	0	NaN	0
04/12/2014	0.4	0	NaN	0
05/12/2014	0	0	NaN	0

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
06/12/2014	6.2	0	NaN	0
07/12/2014	7.2	0	NaN	0
08/12/2014	1	0	NaN	0
09/12/2014	4.6	0	NaN	0
10/12/2014	1.4	0	NaN	0
11/12/2014	0	0	NaN	0
12/12/2014	1.4	0	NaN	0
13/12/2014	4	0	NaN	0
14/12/2014	0	0	NaN	0
15/12/2014	0	0	NaN	0
16/12/2014	0	0	NaN	0
17/12/2014	0.6	0	NaN	0
18/12/2014	0.2	0	NaN	0
19/12/2014	0	0	NaN	0
20/12/2014	0	0	NaN	0
21/12/2014	0	0	NaN	0
22/12/2014	0	0	NaN	0
23/12/2014	0	0	NaN	0
24/12/2014	0	0	NaN	0
25/12/2014	4.8	3.229	1.487	5.97
26/12/2014	0.4	0	NaN	0
27/12/2014	0	0	NaN	0
28/12/2014	0	0	NaN	0
29/12/2014	14	0	NaN	0
30/12/2014	2.8	0	NaN	0
31/12/2014	9.6	0	NaN	0
01/01/2015	23	0	NaN	0
02/01/2015	0.2	0	NaN	0
03/01/2015	0	0	NaN	0
04/01/2015	0.6	0	NaN	0
05/01/2015	20.2	0	NaN	0
06/01/2015	46.4	0	NaN	0
07/01/2015	23.2	0	NaN	0
08/01/2015	12.2	0	NaN	0
09/01/2015	7	1.743	4.016	3.22
10/01/2015	1.4	3.485	0.402	1.89
11/01/2015	1	0	NaN	0
12/01/2015	2	0	NaN	0
13/01/2015	7.4	0	NaN	0
14/01/2015	10.2	0	NaN	0
15/01/2015	2	0	NaN	0
16/01/2015	5	0	NaN	0
17/01/2015	1.2	0	NaN	0
18/01/2015	1	0	NaN	0
19/01/2015	3.4	0	NaN	0
20/01/2015	0	0	NaN	0
21/01/2015	0	0	NaN	0
22/01/2015	0	0	NaN	0
23/01/2015	0	0	NaN	0
24/01/2015	3.4	0	NaN	0
25/01/2015	6.2	0	NaN	0
26/01/2015	2	0	NaN	0
27/01/2015	5.8	0	NaN	0
28/01/2015	0	0	NaN	0
29/01/2015	0	0	NaN	0
30/01/2015	0	0	NaN	0
31/01/2015	0.2	0	NaN	0
01/02/2015	0	0	NaN	0
02/02/2015	0	0	NaN	0
03/02/2015	5.4	0	NaN	0
04/02/2015	0	0	NaN	0
05/02/2015	5.2	0	NaN	0
06/02/2015	2.2	3.2	0.688	1.73
07/02/2015	2.4	0	NaN	0
08/02/2015	0	0	NaN	0
09/02/2015	0	0	NaN	0
10/02/2015	0	0	NaN	0
11/02/2015	0	0	NaN	0
12/02/2015	0	0	NaN	0
13/02/2015	3.2	0	NaN	0
14/02/2015	1.2	0	NaN	0
15/02/2015	0	0	NaN	0
16/02/2015	0	0	NaN	0

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
17/02/2015	0	0	NaN	0
18/02/2015	0	0	NaN	0
19/02/2015	12.2	3.154	3.868	5.83
20/02/2015	1.4	0	NaN	0
21/02/2015	0	0	NaN	0
22/02/2015	0	0	NaN	0
23/02/2015	2.4	0	NaN	0
24/02/2015	3.2	0	NaN	0
25/02/2015	0	0	NaN	0
26/02/2015	0	0	NaN	0
27/02/2015	30.8	0	NaN	0
28/02/2015	7.8	0	NaN	0
01/03/2015	0.8	0	NaN	0
02/03/2015	4.6	0	NaN	0
03/03/2015	0	0	NaN	0
04/03/2015	0	0	NaN	0
05/03/2015	0	0	NaN	0
06/03/2015	9.8	7.405	1.323	13.69
07/03/2015	17.6	0	NaN	0
08/03/2015	0.6	0	NaN	0
09/03/2015	0	0	NaN	0
10/03/2015	0	0	NaN	0
11/03/2015	0	0	NaN	0
12/03/2015	6	0	NaN	0
13/03/2015	1.6	0	NaN	0
14/03/2015	1	0	NaN	0
15/03/2015	0	0	NaN	0
16/03/2015	31.6	0	NaN	0
17/03/2015	0.6	0	NaN	0
18/03/2015	0	0	NaN	0
19/03/2015	0	0	NaN	0
20/03/2015	0	0	NaN	0
21/03/2015	0	0	NaN	0
22/03/2015	0	0	NaN	0
23/03/2015	0	0	NaN	0
24/03/2015	0	0	NaN	0
25/03/2015	0	0	NaN	0
26/03/2015	0	0	NaN	0
27/03/2015	3.8	0	NaN	0
28/03/2015	0.2	0	NaN	0
29/03/2015	0.8	0	NaN	0
30/03/2015	1.4	4.928	0.284	2.67
31/03/2015	0	0	NaN	0
01/04/2015	0	0	NaN	0
02/04/2015	0	0	NaN	0
03/04/2015	5.8	0	NaN	0
04/04/2015	1	0	NaN	0
05/04/2015	0	0	NaN	0
06/04/2015	0	0	NaN	0
07/04/2015	0	0	NaN	0
08/04/2015	2	0	NaN	0
09/04/2015	0	0	NaN	0
10/04/2015	0	0	NaN	0
11/04/2015	0	0	NaN	0
12/04/2015	0	0	NaN	0
13/04/2015	0	0.513	NaN	0.28
14/04/2015	0	0.684	NaN	0.37
15/04/2015	0	0.513	NaN	0.28
16/04/2015	0	1.795	NaN	0.97
17/04/2015	0	0	NaN	0
18/04/2015	0	0.898	NaN	0.49
19/04/2015	0	1.795	NaN	0.97
20/04/2015	0	1.795	NaN	0.97
21/04/2015	2	2.914	0.686	1.58
22/04/2015	0	0	NaN	0
23/04/2015	0	0	NaN	0
24/04/2015	0	0	NaN	0
25/04/2015	0	0	NaN	0
26/04/2015	0	0	NaN	0
27/04/2015	0	0	NaN	0
28/04/2015	0	0	NaN	0
29/04/2015	0.2	8.845	NaN	4.78
30/04/2015	13.8	6.634	2.080	12.26

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
01/05/2015	0.2	0	NaN	0
02/05/2015	6.6	0	NaN	0
03/05/2015	0.2	0	NaN	0
04/05/2015	0	0	NaN	0
05/05/2015	0	0	NaN	0
06/05/2015	0	0	NaN	0
07/05/2015	0	0	NaN	0
08/05/2015	0	0	NaN	0
09/05/2015	0	0	NaN	0
10/05/2015	0	0	NaN	0
11/05/2015	0	2.278	NaN	1.23
12/05/2015	0.4	0	NaN	0
13/05/2015	2.4	1.139	2.107	2.11
14/05/2015	0	1.139	NaN	0.62
15/05/2015	0	0	NaN	0
16/05/2015	0	4.529	NaN	2.45
17/05/2015	0	4.529	NaN	2.45
18/05/2015	0	0	NaN	0
19/05/2015	3.8	0	NaN	0
20/05/2015	0	4.529	NaN	2.45
21/05/2015	0	3.451	NaN	1.87
22/05/2015	0	0	NaN	0
23/05/2015	0	6.902	NaN	3.73
24/05/2015	19	3.451	5.506	6.38
25/05/2015	0	0	NaN	0
26/05/2015	2.2	1.629	1.351	3.01
27/05/2015	0	4.886	NaN	2.64
28/05/2015	0	1.629	NaN	0.88
29/05/2015	0	0	NaN	0
30/05/2015	0	0	NaN	0
31/05/2015	0	0	NaN	0
01/06/2015	2	0	NaN	0
02/06/2015	0.6	4.921	NaN	2.66
03/06/2015	1	0	NaN	0
04/06/2015	0.8	4.921	NaN	2.66
05/06/2015	4.6	14.762	0.312	7.99
06/06/2015	0.8	0	NaN	0
07/06/2015	0	0	NaN	0
08/06/2015	0.8	4.125	NaN	2.23
09/06/2015	12.6	8.25	1.527	15.25
10/06/2015	13.6	12.375	1.099	22.88
11/06/2015	0.4	6.382	NaN	3.45
12/06/2015	3	19.145	0.157	10.36
13/06/2015	0.8	6.382	NaN	3.45
14/06/2015	3	0	NaN	0
15/06/2015	0	6.382	NaN	3.45
16/06/2015	0.2	13.035	NaN	7.05
17/06/2015	1.6	0	NaN	0
18/06/2015	4.8	0	NaN	0
19/06/2015	1.8	0	NaN	0
20/06/2015	4.6	0	NaN	0
21/06/2015	0	0	NaN	0
22/06/2015	0	0	NaN	0
23/06/2015	0.8	0	NaN	0
24/06/2015	9.6	0	NaN	0
25/06/2015	4	0	NaN	0
26/06/2015	7	0	NaN	0
27/06/2015	0.2	0	NaN	0
28/06/2015	0	0	NaN	0
29/06/2015	4	0	NaN	0
30/06/2015	6.8	15.086	0.451	8.16
01/07/2015	5.6	11.659	0.480	6.31
02/07/2015	0	0	NaN	0
03/07/2015	2.8	0	NaN	0
04/07/2015	11	11.659	0.943	6.31
05/07/2015	2.6	3.886	0.669	2.10
06/07/2015	8.6	0	NaN	0
07/07/2015	1.6	3.222	0.497	1.74
08/07/2015	0	3.222	NaN	1.74
09/07/2015	12.4	6.445	1.924	11.91
10/07/2015	37	6.445	5.741	11.91
11/07/2015	77.4	22.316	3.468	41.25
12/07/2015	0.4	0	NaN	0

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
13/07/2015	2	0	NaN	0
14/07/2015	0	0	NaN	0
15/07/2015	0	5.579	NaN	3.02
16/07/2015	0.8	20.032	NaN	10.84
17/07/2015	4.4	0	NaN	0
18/07/2015	2.6	20.032	0.130	10.84
19/07/2015	8.2	0	NaN	0
20/07/2015	12.6	20.032	0.629	10.84
21/07/2015	4.6	0	NaN	0
22/07/2015	0.4	0	NaN	0
23/07/2015	0.4	0	NaN	0
24/07/2015	19	0	NaN	0
25/07/2015	5	0	NaN	0
26/07/2015	0.4	5.221	NaN	2.82
27/07/2015	6.6	0	NaN	0
28/07/2015	0	0	NaN	0
29/07/2015	8.4	5.221	1.609	9.65
30/07/2015	3	0	NaN	0
31/07/2015	18	5.221	3.448	9.65
01/08/2015	1.2	0	NaN	0
02/08/2015	0	0	NaN	0
03/08/2015	0	6.335	NaN	3.43
04/08/2015	3.4	6.335	0.537	3.43
05/08/2015	0	0	NaN	0
06/08/2015	22.8	5.79	3.938	10.70
07/08/2015	2.6	0	NaN	0
08/08/2015	0	0	NaN	0
09/08/2015	0	0	NaN	0
10/08/2015	0	5.79	NaN	3.13
11/08/2015	11.2	10.697	1.047	19.78
12/08/2015	55.8	0	NaN	0
13/08/2015	5.2	0	NaN	0
14/08/2015	3.8	0	NaN	0
15/08/2015	6	0	NaN	0
16/08/2015	13	5.79	2.245	10.70
17/08/2015	7.2	5.79	1.244	10.70
18/08/2015	21	5.79	3.627	10.70
19/08/2015	0	0	NaN	0
20/08/2015	0	0	NaN	0
21/08/2015	0.2	0	NaN	0
22/08/2015	0	0	NaN	0
23/08/2015	0	7.08	NaN	3.83
24/08/2015	0	0	NaN	0
25/08/2015	24	7.08	3.390	13.09
26/08/2015	0	0	NaN	0
27/08/2015	4.4	0	NaN	0
28/08/2015	1.8	0	NaN	0
29/08/2015	21.8	7.453	2.925	13.78
30/08/2015	0	0	NaN	0
31/08/2015	0.2	7.453	NaN	4.03
01/09/2015	3.6	8.372	0.430	4.53
02/09/2015	13.8	0	NaN	0
03/09/2015	7.6	8.372	0.908	4.53
04/09/2015	3.2	0	NaN	0
05/09/2015	9.8	16.744	0.585	9.06
06/09/2015	8.6	5.055	1.701	9.35
07/09/2015	10	20.221	0.495	10.94
08/09/2015	1	5.055	0.198	2.73
09/09/2015	0.2	10.11	NaN	5.47
10/09/2015	0	5.055	NaN	2.73
11/09/2015	0.8	0	NaN	0
12/09/2015	0	0	NaN	0
13/09/2015	0.4	0	NaN	0
14/09/2015	50.4	28.221	1.786	52.17
15/09/2015	55.8	28.221	1.977	52.17
16/09/2015	3	0	NaN	0
17/09/2015	1	44.26	0.023	23.94
18/09/2015	0	0	NaN	0
19/09/2015	0	0	NaN	0
20/09/2015	6.2	0	NaN	0
21/09/2015	8.2	7.174	1.143	13.26
22/09/2015	42.4	14.347	2.955	26.52
23/09/2015	28.6	14.347	1.993	26.52

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
24/09/2015	7	0	NaN	0
25/09/2015	13.8	0	NaN	0
26/09/2015	9	14.463	0.622	7.82
27/09/2015	4.8	14.463	0.332	7.82
28/09/2015	25.6	0	NaN	0
29/09/2015	2.4	0	NaN	0
30/09/2015	8.6	0	NaN	0
01/10/2015	10.8	0	NaN	0
02/10/2015	0.4	0	NaN	0
03/10/2015	18.4	14.335	1.284	26.50
04/10/2015	28	0	NaN	0
05/10/2015	0	0	NaN	0
06/10/2015	0	0	NaN	0
07/10/2015	0	0	NaN	0
08/10/2015	0	0	NaN	0
09/10/2015	0	0	NaN	0
10/10/2015	4	0	NaN	0
11/10/2015	0	0	NaN	0
12/10/2015	0	0	NaN	0
13/10/2015	0	0	NaN	0
14/10/2015	0	0	NaN	0
15/10/2015	8	0	NaN	0
16/10/2015	18.8	11.531	1.630	21.32
17/10/2015	3.4	0	NaN	0
18/10/2015	7	11.531	0.607	6.24
19/10/2015	11.6	0	NaN	0
20/10/2015	4.4	11.531	0.382	6.24
21/10/2015	37	55.237	0.670	29.88
22/10/2015	2.4	0	NaN	0
23/10/2015	2	0	NaN	0
24/10/2015	0	0	NaN	0
25/10/2015	0.6	0	NaN	0
26/10/2015	18.2	7.081	2.570	13.09
27/10/2015	0.4	0	NaN	0
28/10/2015	0	0	NaN	0
29/10/2015	0	0	NaN	0
30/10/2015	0.2	0	NaN	0
31/10/2015	0.2	14.162	NaN	7.66
01/11/2015	2	0	NaN	0
02/11/2015	3.2	32.455	0.099	17.56
03/11/2015	13.6	10.818	1.257	20.00
04/11/2015	1	0	NaN	0
05/11/2015	8.2	0	NaN	0
06/11/2015	0	0	NaN	0
07/11/2015	0	0	NaN	0
08/11/2015	0	0	NaN	0
09/11/2015	1.4	0	NaN	0
10/11/2015	0	0	NaN	0
11/11/2015	13	0	NaN	0
12/11/2015	23.2	0	NaN	0
13/11/2015	35.4	0	NaN	0
14/11/2015	14	0	NaN	0
15/11/2015	10.2	0	NaN	0
16/11/2015	10.8	0	NaN	0
17/11/2015	0.4	0	NaN	0
18/11/2015	0	0	NaN	0
19/11/2015	0.2	0	NaN	0
20/11/2015	68.2	0	NaN	0
21/11/2015	14.6	0	NaN	0
22/11/2015	4.8	0	NaN	0
23/11/2015	16.4	0	NaN	0
24/11/2015	14	0	NaN	0
25/11/2015	0	0	NaN	0
26/11/2015	2	0	NaN	0
27/11/2015	12.4	0	NaN	0
28/11/2015	13.8	0	NaN	0
29/11/2015	9.6	0	NaN	0
30/11/2015	0	0	NaN	0
01/12/2015	0	0	NaN	0
02/12/2015	0	0	NaN	0
03/12/2015	0.8	4.639	NaN	2.51
04/12/2015	2.6	5.116	0.508	2.77
05/12/2015	8.8	0	NaN	0

Precipitación Acumulada diaria (mm)				
Fecha	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS AJU
06/12/2015	9.2	0	NaN	0
07/12/2015	22.2	0	NaN	0
08/12/2015	0.8	0	NaN	0
09/12/2015	0	0	NaN	0
10/12/2015	1.2	0	NaN	0
11/12/2015	0.2	0	NaN	0
12/12/2015	0	0	NaN	0
13/12/2015	0	0	NaN	0
14/12/2015	0	0	NaN	0
15/12/2015	0	0	NaN	0
16/12/2015	0	0	NaN	0
17/12/2015	0	0	NaN	0
18/12/2015	6.4	0	NaN	0
19/12/2015	47.2	4.768	9.899	8.81
20/12/2015	41.8	0	NaN	0
21/12/2015	10	0	NaN	0
22/12/2015	0.2	0	NaN	0
23/12/2015	0	0	NaN	0
24/12/2015	0	0	NaN	0
25/12/2015	0	0	NaN	0
26/12/2015	0	0	NaN	0
27/12/2015	0	0	NaN	0
28/12/2015	0	0	NaN	0
29/12/2015	1.2	0	NaN	0
30/12/2015	0	0	NaN	0
31/12/2015	2.4	0	NaN	0
		B	1.85	

ANEXO II

Datos de precipitación acumulada mensual para estimación del sesgo de campo (B)

Tabla 1. Precipitación acumulada mensual (mm) registrada por la estación meteorológica Lagunas de Montebello, producto satelital CHIRPS Y CHIRPS ajustado.

Fecha	Precipitación mensual (mm)			
	Lagunas de Montebello	CHIRPS	RM	CHIRPS ADJ
ene-14	80.8	6.556	12.32	35.95
feb-14	65.8	6.584	9.99	36.10
mar-14	21.8	16.945	1.29	92.91
abr-14	34.8	13.126	2.65	71.97
may-14	52	127.786	0.41	23.31
jun-14	238.2	222.983	1.07	1222.63
jul-14	185.6	96.382	1.93	528.47
ago-14	161.8	128.352	1.26	703.76
sep-14	406.8	310.955	1.31	1704.99
oct-14	316.6	137.697	2.30	755
nov-14	149.6	21.566	6.94	118.25
dic-14	87	9.591	9.07	52.59
ene-15	185	5.228	35.39	28.67
feb-15	77.4	6.354	12.18	34.84
mar-15	80.4	12.333	6.52	67.62
abr-15	24.8	26.386	0.94	4.81
may-15	34.8	40.091	0.87	7.31
jun-15	89.4	115.766	0.77	21.11
jul-15	255.8	150.192	1.70	823.51
ago-15	205.6	81.383	2.53	446.23
sep-15	325.8	244.48	1.33	1340.50
oct-15	175.8	125.408	1.40	687.62
nov-15	292.4	43.273	6.76	237.27
dic-15	155	14.523	10.67	79.63
		B	5.48	

ANEXO III Balance hidrológico

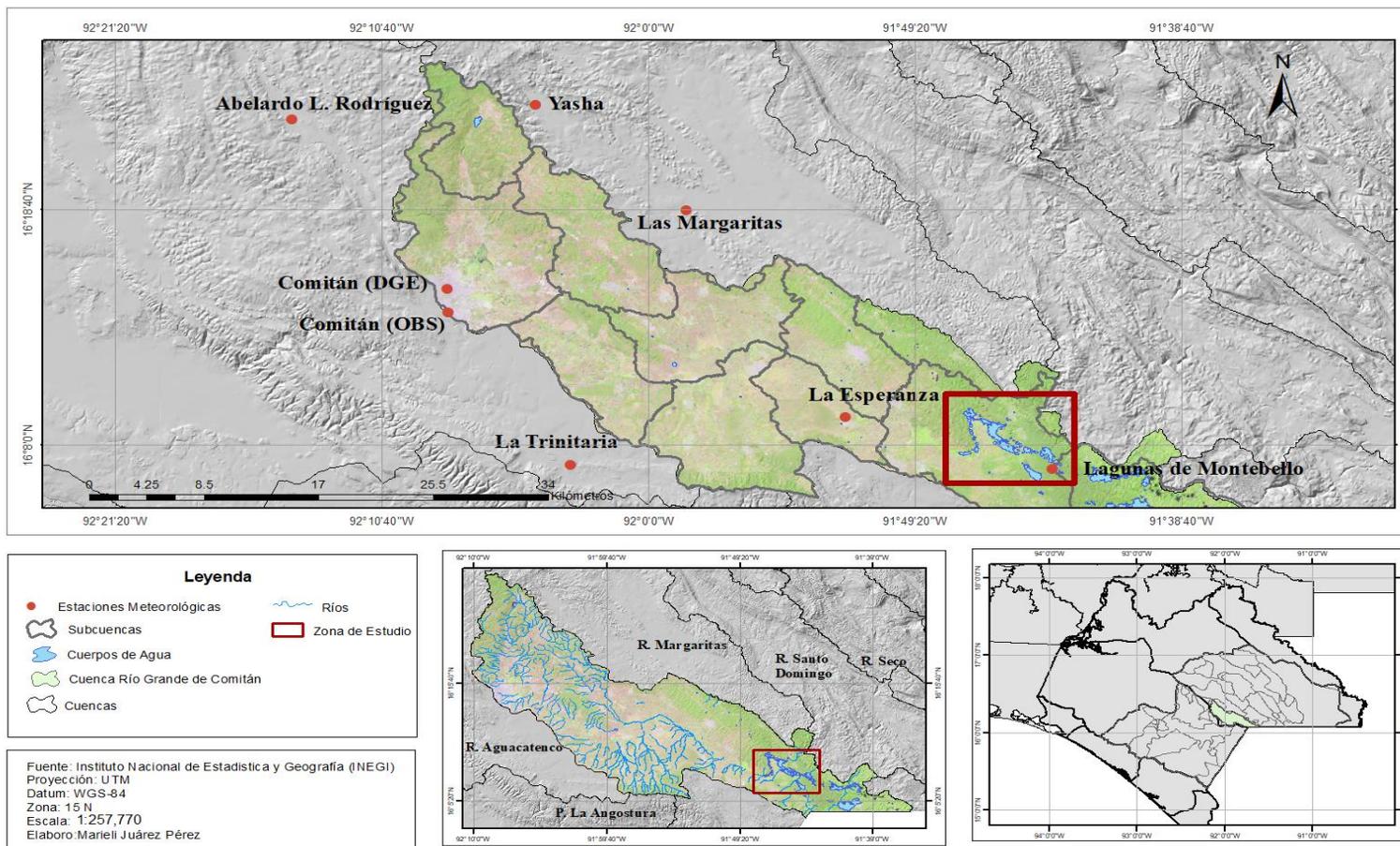


Figura 1 Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca Río Grande de Comitán, Chiapas.

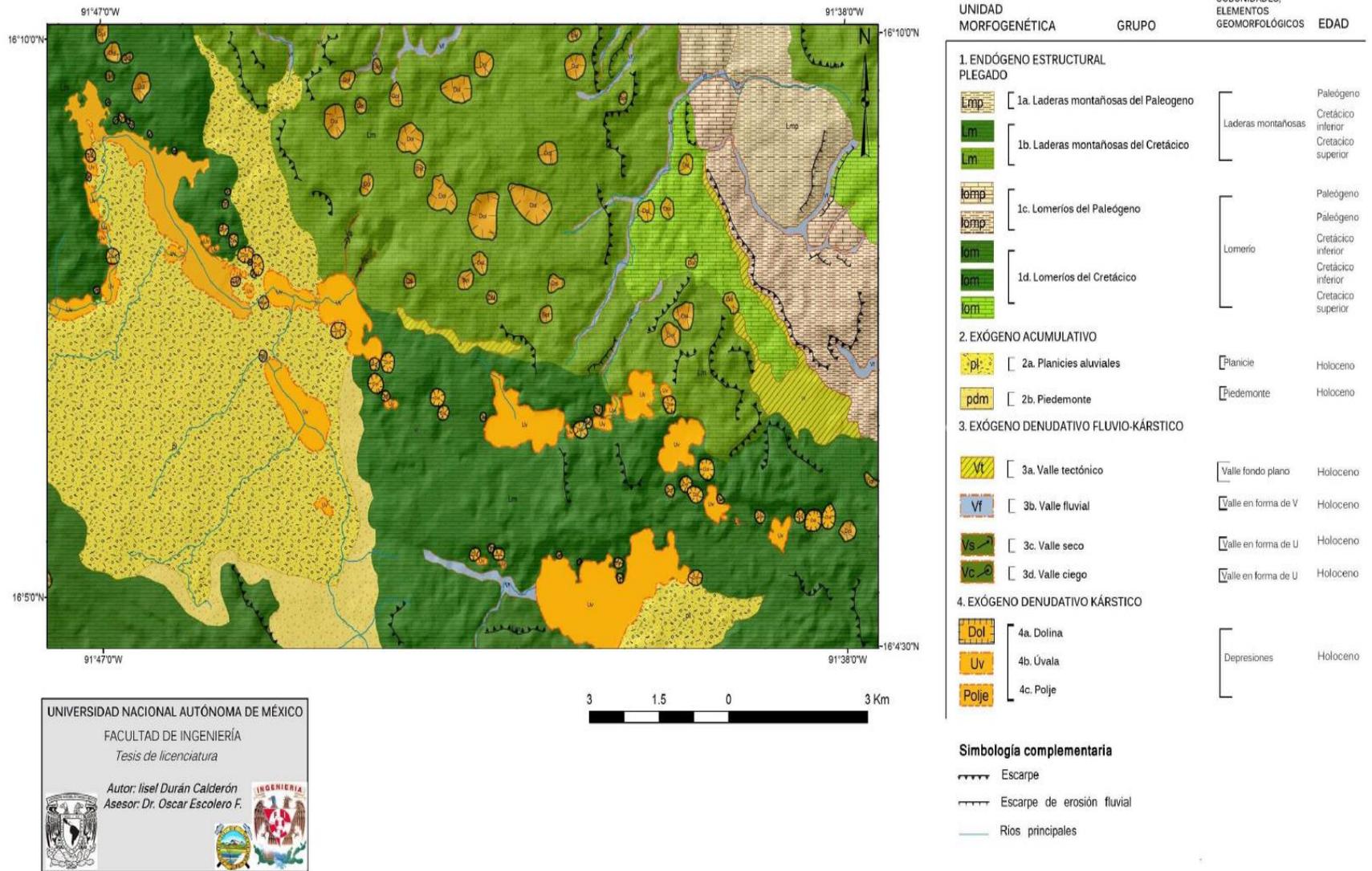


Figura 2 Unidades morfogénicas del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Fuente: Durán (2013).

Balance hidrológico - evapotranspiración

Tabla 1. Cálculo de evapotranspiración potencial (ETP) mensual por el método de Thornthwaite en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Fecha	T _{media} (°C)	i	ETP SIN CORREGIR (cm/mes)	Ka	ETP (cm/mes)
ene-14	13.9	4.7	4.26	0.975	4.15
feb-14	16.64	6.17	5.87	0.905	5.31
mar-14	18.22	7.08	6.9	1.03	7.11
abr-14	19.38	7.78	7.71	1.04	8.01
may-14	18.74	7.39	7.26	1.105	8.02
jun-14	18.94	7.51	7.4	1.085	8.03
jul-14	18.51	7.26	7.1	1.11	7.88
ago-14	19.05	7.58	7.48	1.09	8.15
sep-14	18.49	7.24	7.09	1.02	7.23
oct-14	17.95	6.93	6.73	1.01	6.79
nov-14	15.25	5.41	5.03	0.955	4.8
dic-14	14.84	5.19	4.79	0.95	4.55
ene-15	14.43	4.98	4.38	0.975	4.27
feb-15	14.95	5.25	4.68	0.905	4.24
mar-15	16.91	6.33	5.87	1.03	6.05
abr-15	19.97	8.14	7.99	1.04	8.31
may-15	19.29	7.72	7.49	1.105	8.28
jun-15	19.1	7.61	7.36	1.085	7.99
jul-15	18.56	7.28	6.98	1.11	7.74
ago-15	19.24	7.69	7.46	1.09	8.13
sep-15	19.13	7.62	7.38	1.02	7.52
oct-15	19.06	7.58	7.33	1.01	7.4
nov-15	17.75	6.81	6.43	0.955	6.14
dic-15	17.36	6.58	6.16	0.95	5.86
	I	a			
2014	80.24	1.78			
2015	83.59	1.85			

Tabla 2. Valores de Ka mensuales de acuerdo con la latitud para el hemisferio norte.

Latitud en grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.9	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1	0.83	0.91
30	0.9	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.2	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.7

Fuente: Aparicio, 1992

Balance hidrológico – escurrimiento superficial

Se presentan los resultados obtenidos de la simulación de dichas variables correspondientes a Paso del Soldado. Para los cálculos de caudal, se tuvieron en cuenta todos los aforos realizados en cada una de las estaciones de monitoreo. Con base en la información mostrada en las Tablas 5.8 y 5.9, se estiman las variaciones del tirante (y), área transversal (A), el perímetro de mojado (P) y el radio hidráulico (R_h) únicamente para el sitio Paso del Soldado.

Para las estimaciones en las variaciones de cada variable a lo largo del año, se consideró como referencia el aforo hecho en mayo 2014. A partir de los datos de aforo, se estiman primero las variaciones de profundidad a lo largo del tiempo. Las estimaciones se obtienen al simular una variación en la profundidad de ± 0.1 m. Posteriormente, se estima que el área presenta una variación de 0.85 m^2 .

El tirante se estima a partir de la resta entre la profundidad mínima menos 0.475 , este último valor correspondiente a la altura del cilindro en donde se encuentra colocado el sensor. Las variaciones de área y tirante se utilizan para la predicción de dichas variables a diferentes profundidades.

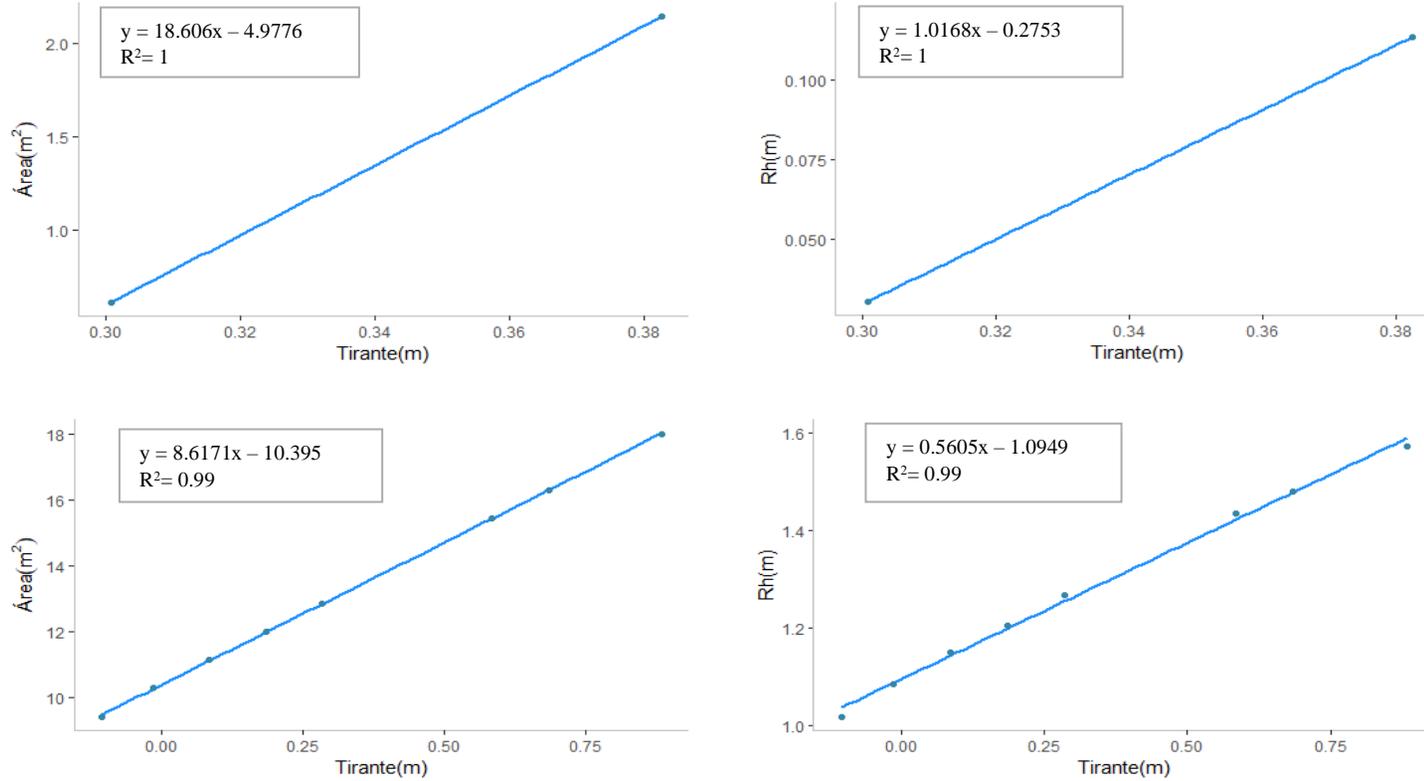


Figura 3. Diagramas de dispersión de área (m²) y radio hidráulico (m) contra tirante (m) simulado. Los gráficos superiores corresponden al sitio de monitoreo El Carrizal. Los gráficos inferiores corresponden al sitio de monitoreo Paso del Soldado.

Tabla 3. Simulación de datos en el sitio de muestreo: Paso del Soldado, Chiapas.

Profundidad (m)	A (m²)	Tirante (m)	Pm (m)	Rh (m)
0.37	9.43	-0.105	9.27	1.02
0.46	10.3	-0.015	9.49	1.09
0.56	11.15	0.085	9.71	1.15
0.66	12	0.185	9.97	1.20
0.76	12.85	0.285	10.14	1.27
1.06	15.45	0.585	10.77	1.43
1.16	16.3	0.685	11.01	1.48
1.36	18	0.885	11.44	1.57

Tabla 4. Estimación de caudales medios mensuales (m³/s) a partir de las variaciones de presión (cm) medidas en el sitio El Carrizal, Chiapas.

Fecha	P (cm)	P₀ (hPa)	P₀ (cm)	ΔP	Tirante (m)	A (m²)	RH(m)	V (m/s)	Q(m³/s)
oct-14	945.91	852.34	866.44	79.47	0.52	4.78	0.26	1.86	8.79
nov-14	939.1	854.76	870.39	68.68	0.42	2.78	0.15	1.32	3.36
dic-14	938.67	854.6	871.44	67.22	0.4	2.51	0.13	1.28	3.25
ene-15	939.37	855.48	871.16	68.21	0.41	2.69	0.14	1.29	3.18
feb-15	937.35	854.31	871.14	66.21	0.39	2.32	0.12	1.21	2.86
mar-15	936.62	854.31	871.14	65.49	0.38	2.18	0.12	1.16	2.58
abr-15	934.48	852.32	869.11	65.37	0.38	2.16	0.11	1.15	2.55
may-15	936.15	853.28	868.91	67.23	0.4	2.51	0.13	1.23	2.8
jun-15	936.37	852.99	869.8	66.57	0.4	2.38	0.13	1.23	2.99

P = presión, P₀= presión atmosférica, ΔP = diferencia de presión, A= área, RH = radio hidráulico, V= velocidad, Q = caudal. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de presión medidos en campo con sensores y estación meteorológica Lagunas de Montebello, CONAGUA-SMN.

Tabla 5. Estimación de caudales medios mensuales (m^3/s) a partir de las variaciones de presión (cm) medidas en el sitio Paso del Soldado, Chiapas.

Fecha	P(cm)	P ₀ (hPa)	P ₀ (cm)	ΔP	Tirante (m)	A (m^2)	RH(m)	V (m/s)	Q(m^3/s)
ene-14	1095.46	855.03	871.87	223.59	0.60	15.53	1.43	0.24	3.67
feb-14	1083.77	853.25	870.06	213.71	0.50	14.68	1.37	0.23	3.38
mar-14	1075.34	853.33	870.14	205.20	0.41	13.95	1.33	0.22	3.13
abr-14	1071.19	852.78	869.58	201.76	0.38	13.53	1.30	0.22	3
may-14	1075.47	853.11	869.92	205.55	0.42	13.98	1.33	0.22	3.14
oct-14	951.34	852.34	869.14	82.47	0.82	17.48	1.56	0.25	4.38
nov-14	931.20	854.76	870.39	59.52	0.60	15.52	1.43	0.24	3.67
dic-14	917.94	855.47	872.33	44.65	0.45	14.24	1.36	0.23	3.28
ene-15	916.98	855.48	871.16	45.83	0.46	14.34	1.35	0.23	3.23
feb-15	904.67	854.31	869.84	33.48	0.33	13.28	1.28	0.22	2.92
mar-15	900.65	854.30	871.13	29.51	0.30	12.94	1.26	0.22	2.81
abr-15	889.22	852.31	869.11	20.12	0.20	12.13	1.21	0.21	2.56
may-15	885.68	853.28	870.08	15.6	0.16	11.74	1.18	0.21	2.44
jun-15	871.87	852.51	869.31	2.56	0.03	10.62	1.11	0.2	2.12
jul-15	876.46	854.13	870.96	5.50	0.06	10.87	1.13	0.2	2.19
ago-15	873.14	853.39	870.20	2.94	0.03	10.65	1.11	0.2	2.13
sep-15	872.91	852.3	869.09	3.82	0.04	10.72	1.12	0.2	2.15
oct-15	880.17	852.47	869.26	10.91	0.11	11.34	1.16	0.2	2.33
nov-15	875.13	852.57	869.37	5.77	0.06	10.89	1.13	0.2	2.20
dic-15	872.41	852.93	869.73	2.67	0.03	10.62	1.11	0.2	2.12

P = presión, P₀= presión atmosférica, ΔP = diferencia de presión, A= área, RH = radio hidráulico, V= velocidad, Q = caudal. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de presión medidos en campo con sensores y estación meteorológica Lagunas de Montebello, CONAGUA-SMN.

Tabla 6. Valores del coeficiente de Manning (η) para canales naturales y recubiertos.

A) Canales Naturales

Tipo de Canal		Características	Mínimo	Normal	Máximo
A.1 Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas <30m)	a) Corrientes en planicies	Limpios, rectos, sin deslaves ni remansos profundos	0.025	0.03	0.033
		Igual al anterior, pero más rocosos y con hierba	0.03	0.035	0.04
		Limpio, curvo, algunas irregularidades del fondo	0.033	0.04	0.045
		Igual al anterior, algo de hierba y roca	0.35	0.045	0.5
		Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco eficientes	0.04	0.048	0.055
		Igual que el 4, pero más rocas	0.045	0.05	0.06
		Tramos irregulares con hierba y estanques profundos	0.05	0.07	0.08
		Tramos con mucha hierba, estanques profundos, o cauces de avenidas con raíces y plantas subacuáticas	0.075	0.1	0.15
	b) Corrientes de montañas, sin vegetación en el cauce; taludes muy inclinados, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes que quedan sumergidas en las avenidas	Fondo de: grava, boleó y algunos cantos rodados	0.03	0.04	0.05
		Fondo de: boleó y grandes rocas	0.4	0.05	0.07
A.2 Planicies de Avenidas	a) Pastura sin arbustos	Pasto bajo	0.025	0.03	0.035
		Pasto alto	0.03	0.035	0.05
	b) Áreas cultivadas	Sin cosecha	0.02	0.03	0.04
		Cosecha en tierra labrada y pradera	0.025	0.035	0.045
		Cosecha de campo	0.03	0.04	0.05
	c) Arbustos	Arbustos diseminados y mucha hierba	0.035	0.05	0.07
		Pocos arbustos y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
		Pocos arbustos y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
		Mediana a densa población de arbustos, en invierno	0.045	0.07	0.11
		Mediana a densa población de arbustos, en verano	0.07	0.1	0.16
	d) Árboles	Población densa de sauces, en verano, rectos	0.11	0.15	0.2
		Terrenos talados con troncos muertos	0.03	0.04	0.05
		Igual al anterior, pero con troncos retoñables	0.05	0.06	0.08
		Árboles de sombra y avenidas debajo de las ramas	0.08	0.1	0.12
		Igual al anterior, pero las avenidas alcanzar a las ramas	0.1	0.12	0.16
	A.3 Ríos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas > 30 m) La n es menor que los arroyos de igual descripción porque los bordes ofrecen menor resistencia	a) Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos		0.025	
b) Secciones rugosas e irregulares			0.035		0.1

B) Canales Recubiertos

Tipo de Canal		Características	Mínimo	Normal	Máximo
B.1 Metales	a) Superficies de acero lisas	1. No pintadas	0.011	0.012	0.014
		2. Pintadas	0.012	0.013	0.017
	b) Corrugadas		0.021	0.025	0.03
B.2 No metales	a) Cemento	1. Superficie lisa	0.01	0.011	0.013
		2. En mortero	0.011	0.013	0.015
	b) Madera	1. Plana, no tratada	0.01	0.012	0.014
		2. Plana, creosotada	0.011	0.012	0.015
		3. Rústica	0.011	0.013	0.015
		4. Tablones y tejamanil	0.012	0.015	0.018
		5. Cubierta con tela	0.01	0.014	0.017
	c) Concreto	1. Acabado con llana metálica	0.011	0.013	0.015
		2. Acabado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
		3. Acabado con grava en el fondo	0.015	0.017	0.02
		4. Sin acabar	0.014	0.017	0.02
		5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
		6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
		7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.02	
		8. Sobre roca irregular excavada	0.022	0.027	
	d) Fondo de concreto, acabado con llana y taludes de:	1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.02
		2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.02	0.024
		3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.02	0.024
		4. Mampostería de piedra cementada	0.02	0.025	0.03
		5. Piedra suelta o riprap	0.02	0.03	0.035
	e) Fondo de gravas con lados de	1. Concreto encofrado	0.017	0.02	0.025
		2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.02	0.023	0.026
		3. Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036
	f) Ladrillo	1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
		2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
	g) Mampostería	1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.03
		2. Piedra suelta	0.023	0.035	0.035
	h) Bloque de piedra labrados		0.013	0.015	0.017
	i) Asfalto	1. Liso	0.013	0.013	
		2. Rugoso	0.016	0.016	
	j) Revestimiento vegetal		0.03		0.5

Fuente: Modificado a partir de Ven Te Chow (1994).

Balance hidrológico – variaciones de volumen

Tabla 7. Estimación de las variaciones en el almacenamiento de siete lagos pertenecientes al sistema lacustre de Montebello, Chiapas, en octubre de 2014 y marzo de 2015.

Volumen de agua en los cuerpos lacustres para el mes de octubre 2014					Volumen de agua en los cuerpos lacustres para el mes de marzo de 2015				
Lago	A (ha)	P (m)	Z _{prom} (m)	V (m ³)	Lago	A (ha)	P (m)	Z _{prom} (m)	V (m ³)
Balantetic	15.93	2701.24	1.7	270828.7	Balantetic	12.78	2702.26	1.7	217249.8
Bosque Azul	54.44	7273	20	10887780	Bosque Azul	53.15	7009.41	20	10629380
Chajchaj	9.63	1678.78	5.3	510139.31	Chajchaj	8.72	1502.17	5.3	462411.75
Esmeralda	1.44	600.414	3.6	51876.72	Esmeralda	1.53	541.806	3.6	55162.44
La Encantada	7.73	1379.61	29.4	2273131.56	La Encantada	7.82	1442.95	29.4	2300100.18
Liquidambar	41.22	7922.58	11.2	4616393.6	Liquidambar	42.86	7278.12	11.2	4799793.6
San Lorenzo	186.97	19095.1	11.8	22062224	San Lorenzo	185.4	18782.3	11.8	21877554
Total	317.35383	40650.724		40672373.9	Total	312.26511	39259.016		40341651.8

A= área, P = perímetro, Z_{prom}= profundidad promedio, V= volumen. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales Landsat 8, software ArcGIS y Alcocer *et al.* (2016).

ANEXO IV

Método racional

Tiempo de concentración (Tc)

El tiempo de concentración (Tc) hace referencia al tiempo que tarda el agua que cae en un extremo más alejado de la subcuenca para llegar a la salida de la subcuenca. El Tc se puede estimar a partir de la ecuación de Kirpich:

$$Tc = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde S es la pendiente media del cauce principal, L es la longitud del cauce principal expresada en m y Tc expresada en h.

La pendiente media (S) se calcula a partir de la ecuación Taylor-Schwartz cuando los tramos de longitud no son igual:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Donde l_1 es la longitud del tramo i , L es la distancia en m

Los valores de distancia y pendiente para cada tramo, pendiente y longitud del cauce principal se calcularon a partir de datos vectoriales realizados por INEGI para la región hidrológica RH30, continuo de elevaciones mexicano (CEM), datos vectoriales de subcuencas (Alvarado, 2022) y el software ArcGIS.

$$S = \left[\frac{3929.026}{52094.105} \right]^2 = 0.0057$$

S=0.006 m/m

L= 14537.49 m

$$Tc = 0.000325 * \frac{14537.49^{0.77}}{0.006^{0.385}} = 3.74 h$$

Curvas IDF- Datos de precipitación máxima en 24 horas registradas por la estación meteorológica Lagunas de Montebello

Tabla 1. Datos mensuales de precipitación máxima (mm) en 24 horas.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máx.
2013	27.8	22	11.6	4.6	12	56	34.4	42.6	68.2	39.4	30	41	68.2
2014	21.2	17.4	7.2	10.4	19.2	40.8	52.2	40	55.6	58.2	38.6	24	58.2
2015	46.4	30.8	31.6	13.8	19	13.6	77.4	55.8	55.8	37	68.2	47.2	77.4
2016	24.8	24	9.8	3.4	19.8	30.2	47.6	36.2	29	20.8	0	105.8	105.8
2017	21.2	12	4.8	15.4	44	63	45.6	50	46.8	42.2	38.8	16.4	63
2018	62.6	47.6	8.8	10.8	16.6	30.4	31.2	22.4	27.6	86.2	73.6	20.8	86.2
2019	16.4	37.6	11.6	29.4	10.4	39.6	47.4	40	31.6	38	30.4	24.6	47.4
2020	41.4	17.8	17.2	32.8	33	31.8	38	44.4	91.2	27.6	79.6	13.2	91.2
2021	15.4	9.4	11.6	37.6	36.6	12	28	63.4	42	27	22.8	39.4	63.4
Máx.	62.6	47.6	31.6	37.6	44	63	77.4	63.4	91.2	86.2	79.6	105.8	

Tabla 2. Precipitación máxima (mm) en 24 horas registrada en intervalos de tiempo.

Año	Precipitación máxima (mm) registrada en intervalos de tiempo							
	30 min	1 h	2h	3h	4h	6h	12h	24h
2013	25.4	37.6	49.2	49.2	49.2	62.8	62.8	68.2
2014	20	28.4	28.4	32.2	33.4	49.2	57.6	58.2
2015	19	27.8	33.4	47	51	55.6	57.4	77.4
2016	20.6	25.4	32	38	41	54.8	94.4	105.8
2017	27.4	50	52.4	52.4	52.4	52.4	52.6	63
2018	25.6	26	30.4	44.8	54	66.4	71.8	86.2
2019	27	27.8	32	29.2	32.6	36	37.2	47.4
2020	27.6	45.2	62.2	63	63	63	63	91.2
2021	18.8	21.2	29.6	30.8	33.4	50.6	63.2	63.4

Tabla 3. Intensidad de precipitación máxima (mm/h) en 24 horas registrada en intervalos de tiempo.

Año	Intensidad de precipitación máxima (mm/h) en intervalos de tiempo							
	30 min	1 h	2h	3h	4h	6h	12h	24h
2013	50.8	37.6	24.6	16.4	12.3	10.5	5.2	2.8
2014	40	28.4	14.2	10.7	8.4	8.2	4.8	2.4
2015	38	27.8	16.7	15.7	12.8	9.3	4.8	3.2
2016	41.2	25.4	16	12.7	10.3	9.1	7.9	4.4
2017	54.8	50	26.2	17.5	13.1	8.7	4.4	2.6
2018	51.2	26	15.2	14.9	13.5	11.1	6.0	3.6
2019	54	27.8	16	9.7	8.2	6.0	3.1	2.0
2020	55.2	45.2	31.1	21.0	15.8	10.5	5.3	3.8
2021	37.6	21.2	14.8	10.3	8.4	8.4	5.3	2.6

Tabla 4. Variables probabilísticas para precipitaciones máximas (mm) registrada en intervalos de duración.

Variable	Cálculo de variables probabilísticas							
	30 min	1 h	2h	3h	4h	6h	12h	24h
\bar{x}	46.98	32.16	19.42	14.32	11.39	9.09	5.19	3.06
S	7.59	9.84	6.19	3.78	2.72	1.53	1.28	0.76
α	0.17	0.13	0.21	0.34	0.47	0.84	1.00	1.68
β	46.88	32.08	19.30	14.12	11.12	8.60	4.61	2.09

Tabla 5. Valores Ajustados por el método de Gumbel.

Período de retorno	Duración (min)/Intensidad (mm/h)							
	30	60	120	180	240	360	720	1440
2	46.94	32.13	19.38	14.25	11.29	8.91	4.97	2.71
5	47.13	32.28	19.61	14.63	11.82	9.86	6.11	4.61
10	47.26	32.37	19.77	14.89	12.18	10.49	6.86	5.87
20	47.38	32.47	19.92	15.13	12.52	11.10	7.58	7.08

Tabla 6. Determinación de los parámetros x_1 , x_2 e Y por el método de regresión lineal múltiple.

n	T (años)	I (mm/h)	D(min)	Y=log I	X ₁ =log T	X ₂ =log D	Y*X ₁	Y*X ₂	X ₁ *X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²
1	2	46.94	30	1.67	0.3	1.48	0.50	2.47	0.44	0.09	2.18
2	5	47.13	30	1.67	0.7	1.48	1.17	2.47	1.03	0.49	2.18
3	10	47.26	30	1.67	1	1.48	1.67	2.47	1.48	1.00	2.18
4	20	47.38	30	1.68	1.3	1.48	2.18	2.48	1.92	1.69	2.18
5	2	32.13	60	1.51	0.3	1.78	0.45	2.68	0.54	0.09	3.16
6	5	32.28	60	1.51	0.7	1.78	1.05	2.68	1.24	0.49	3.16
7	10	32.37	60	1.51	1	1.78	1.51	2.69	1.78	1.00	3.16
8	20	32.47	60	1.51	1.3	1.78	1.97	2.69	2.31	1.69	3.16
9	2	19.38	120	1.29	0.3	2.08	0.39	2.68	0.63	0.09	4.32
10	5	19.61	120	1.29	0.7	2.08	0.90	2.69	1.45	0.49	4.32
11	10	19.77	120	1.30	1	2.08	1.30	2.69	2.08	1.00	4.32
12	20	19.92	120	1.30	1.3	2.08	1.69	2.70	2.71	1.69	4.32
13	2	14.25	180	1.15	0.3	2.26	0.35	2.60	0.68	0.09	5.09
14	5	14.63	180	1.17	0.7	2.26	0.81	2.63	1.58	0.49	5.09
15	10	14.89	180	1.17	1	2.26	1.17	2.64	2.26	1.00	5.09
16	20	15.13	180	1.18	1.3	2.26	1.54	2.66	2.93	1.69	5.09
17	2	11.29	240	1.05	0.3	2.38	0.32	2.51	0.72	0.09	5.67
18	5	11.82	240	1.07	0.7	2.38	0.75	2.55	1.66	0.49	5.67
19	10	12.18	240	1.09	1	2.38	1.09	2.58	2.38	1.00	5.67
20	20	12.52	240	1.10	1.3	2.38	1.43	2.61	3.10	1.69	5.67
21	2	8.91	360	0.95	0.3	2.56	0.29	2.43	0.77	0.09	6.53
22	5	9.86	360	0.99	0.7	2.56	0.69	2.54	1.79	0.49	6.53
23	10	10.49	360	1.02	1.0	2.56	1.02	2.61	2.56	1.00	6.53
24	20	11.10	360	1.05	1.3	2.56	1.36	2.67	3.33	1.69	6.53
25	2	4.97	720	0.70	0.3	2.86	0.21	1.99	0.86	0.09	8.16
26	5	6.11	720	0.79	0.7	2.86	0.55	2.25	2.00	0.49	8.16
27	10	6.86	720	0.84	1	2.86	0.84	2.39	2.86	1.00	8.16
28	20	7.58	720	0.88	1.3	2.86	1.14	2.51	3.72	1.69	8.16
29	2	2.71	1440	0.43	0.3	3.16	0.13	1.37	0.95	0.09	9.98
30	5	4.61	1440	0.66	0.7	3.16	0.46	2.10	2.21	0.49	9.98
31	10	5.87	1440	0.77	1	3.16	0.77	2.43	3.16	1.00	9.98
32	20	7.08	1440	0.85	1.3	3.16	1.11	2.68	4.11	1.69	9.98
Total				36.81	26.41	74.17	30.81	80.14	61.21	26.17	180.37

El sistema de ecuaciones es:

$$32 a_0 + 26.41 a_1 + 74.17 a_2 = 36.81$$

$$26.41 a_0 + 26.17 a_1 + 61.21 a_2 = 30.81$$

$$74.17 a_0 + 61.21 a_1 + 180.37 a_2 = 80.14$$

Resolución del sistema de ecuaciones por el método de mínimos cuadrados

1. Las ecuaciones se expresan en forma matricial y se calcula la matriz inversa

Matriz

$$\bar{a}_3 = \begin{bmatrix} 36.81 \\ 30.81 \\ 180.37 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{matrix} & \mathbf{a_0} & \mathbf{a_1} & \mathbf{a_2} \\ \begin{bmatrix} 32 & 26.41 & 74.17 \\ 26.41 & 26.17 & 61.21 \\ 74.17 & 61.21 & 180.37 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A^T = \begin{bmatrix} 0.82 & -0.19 & -0.27 \\ -0.19 & 0.23 & 0 \\ -0.27 & 0 & 0.19 \end{bmatrix}$$

2. La matriz inversa se multiplica por el vector a_3 , para obtener los valores de cada variable

$$A^T \bar{a}_3 = \begin{bmatrix} 36.81 \\ 30.81 \\ 180.14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.82 & -0.19 & -0.27 \\ -0.19 & 0.23 & 0 \\ -0.27 & 0 & 0.19 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.487 \\ 0.098 \\ -0.612 \end{bmatrix}$$

3. Finalmente, se obtiene los valores de K, m y n a partir de $y = \text{Log } i$, $a_0 = \log k$, $a_1 = m$, $x_1 = \log T$, $a_2 = -n$, $x_2 = \log(d + c)$, se considera a $c = 0$

$$k = 306.573$$

$$m = 0.098$$

$$n = 0.612$$

4. La ecuación propuesta por Aparicio (1992) es:

$$I = \frac{306.573 * T^{0.098}}{D^{0.612}}$$

Curvas IDF- Datos de precipitación máxima en 24 horas registradas por el producto CHIRPS en Lagunas de Montebello

Tabla 7. Datos mensuales de precipitación máxima (mm) en 24 horas.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Máximo
2013	8.77	6.34	9.16	1.78	7.40	61.58	45.34	40.65	41.06	44.31	31.85	11.91	61.58
2014	6.15	6.94	9.17	3.32	21.70	27.56	31.94	24.38	38.45	40.47	16.54	11.76	40.47
2015	3.22	5.83	13.69	12.26	6.38	22.88	41.25	19.78	52.17	29.88	20.00	8.81	52.17
2016	3.25	3.66	13.90	2.98	21.23	37.44	33.20	29.45	42.43	15.80	6.16	32.01	42.43
2017	5.44	2.11	3.50	11.43	27.86	55.28	22.78	36.44	39.83	31.17	10.32	7.23	55.28
2018	7.42	6.80	9.39	3.66	14.71	41.06	16.84	19.45	20.00	86.25	26.92	9.85	86.25
2019	0.00	2.53	4.18	1.05	15.40	31.53	31.61	21.29	32.39	41.10	16.95	31.57	41.10
2020	2.45	3.49	2.50	8.14	18.73	24.14	33.31	32.24	36.08	27.97	29.92	18.57	36.08
2021	1.95	1.96	14.05	2.21	21.56	13.07	31.28	57.78	39.20	16.92	3.81	22.30	57.78
Máx.	8.77	6.94	14.05	12.26	27.86	61.58	45.34	57.78	52.17	86.25	31.85	32.01	86.25

Tabla 8. Distribución de la probabilidad pluviométrica mediante Gumbel.

N°	Año	Precipitación máxima	Precipitación (mm)	
			x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	2013	61.58	61.58	81.160079
2	2014	40.47	40.47	146.43689
3	2015	52.17	52.17	0.16089012
4	2016	42.43	42.43	102.842135
5	2017	55.28	55.28	7.33807901
6	2018	86.25	86.25	1134.26756
7	2019	41.1	41.1	131.58639
8	2020	36.08	36.08	271.956746
9	2021	57.78	57.78	27.1325235
Total			473.14	1902.88129

Tabla 9. Variables probabilísticas para precipitación máxima de 24 horas.

Cálculo de variables probabilísticas	
Variable	24h
\bar{x}	52.57
S	15.42
α	12.03
β	4.63

Tabla 10. Cálculo de precipitación máxima diaria probable en 24 horas para distintas frecuencias.

Período Retorno Años	Probabilidad de ocurrencia F(x)	Variable Reducida Y _T	Precipitación (mm) X	Corrección intervalo fijo X _T (mm)
2	0.5000	0.3665	50.0376	56.5425
5	0.8000	1.4999	63.6671	71.9438
10	0.9000	2.2504	72.6910	82.1409
20	0.9500	2.9702	81.3470	91.9221

Tabla 11. Precipitación máxima (mm) en 24 horas registrada en intervalos de tiempo.

Período de retorno	Precipitación máxima (mm) registrada en intervalos de tiempo						
	1	2	3	4	6	12	24
2	16.96	22.05	26.01	29.40	34.49	45.23	56.54
5	21.58	28.06	33.09	37.41	43.89	57.56	71.94
10	24.64	32.03	37.78	42.71	50.11	65.71	82.14
20	27.58	35.85	42.28	47.80	56.07	73.54	91.92

Nota. Precipitación corregida con el factor 1.13

Tabla 12. Intensidad de precipitación máxima (mm/h) en 24 horas registrada en intervalos de tiempo.

Período de retorno	Intensidad de la lluvia (mm /h) según el período de retorno en intervalos de tiempo						
	60	120	180	240	360	720	1440
2	16.96	11.03	8.67	7.35	5.75	3.77	2.36
5	21.58	14.03	11.03	9.35	7.31	4.80	3.00
10	24.64	16.02	12.59	10.68	8.35	5.48	3.42
20	27.58	17.92	14.09	11.95	9.35	6.13	3.83

Tabla 13. Determinación de los parámetros x_1 , x_2 e Y por el método de regresión lineal múltiple.

n	T (años)	I (mm/h)	D(min)	Y=log I	X ₁ =log T	X ₂ =log D	Y*X ₁	Y*X ₂	X ₁ *X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²
1	2	16.96	60.00	1.23	0.30	1.78	0.37	2.19	0.54	0.09	3.16
2	5	21.58	60.00	1.33	0.70	1.78	0.93	2.37	1.24	0.49	3.16
3	10	24.64	60.00	1.39	1.00	1.78	1.39	2.47	1.78	1.00	3.16
4	20	27.58	60.00	1.44	1.30	1.78	1.87	2.56	2.31	1.69	3.16
5	2	11.03	120.00	1.04	0.30	2.08	0.31	2.17	0.63	0.09	4.32
6	5	14.03	120.00	1.15	0.70	2.08	0.80	2.38	1.45	0.49	4.32
7	10	16.02	120.00	1.20	1.00	2.08	1.20	2.50	2.08	1.00	4.32
8	20	17.92	120.00	1.25	1.30	2.08	1.63	2.61	2.71	1.69	4.32
9	2	8.67	180.00	0.94	0.30	2.26	0.28	2.12	0.68	0.09	5.09
10	5	11.03	180.00	1.04	0.70	2.26	0.73	2.35	1.58	0.49	5.09
11	10	12.59	180.00	1.10	1.00	2.26	1.10	2.48	2.26	1.00	5.09
12	20	14.09	180.00	1.15	1.30	2.26	1.49	2.59	2.93	1.69	5.09
13	2	7.35	240.00	0.87	0.30	2.38	0.26	2.06	0.72	0.09	5.67
14	5	9.35	240.00	0.97	0.70	2.38	0.68	2.31	1.66	0.49	5.67
15	10	10.68	240.00	1.03	1.00	2.38	1.03	2.45	2.38	1.00	5.67
16	20	11.95	240.00	1.08	1.30	2.38	1.40	2.56	3.10	1.69	5.67
17	2	5.75	360.00	0.76	0.30	2.56	0.23	1.94	0.77	0.09	6.53
18	5	7.31	360.00	0.86	0.70	2.56	0.60	2.21	1.79	0.49	6.53
19	10	8.35	360.00	0.92	1.00	2.56	0.92	2.36	2.56	1.00	6.53
20	20	9.35	360.00	0.97	1.30	2.56	1.26	2.48	3.33	1.69	6.53
21	2	3.77	720.00	0.58	0.30	2.86	0.17	1.65	0.86	0.09	8.16
22	5	4.80	720.00	0.68	0.70	2.86	0.48	1.95	2.00	0.49	8.16
23	10	5.48	720.00	0.74	1.00	2.86	0.74	2.11	2.86	1.00	8.16
24	20	6.13	720.00	0.79	1.30	2.86	1.02	2.25	3.72	1.69	8.16
25	2	2.36	1440.00	0.37	0.30	3.16	0.11	1.18	0.95	0.09	9.98
26	5	3.00	1440.00	0.48	0.70	3.16	0.33	1.51	2.21	0.49	9.98
27	10	3.42	1440.00	0.53	1.00	3.16	0.53	1.69	3.16	1.00	9.98
28	20.00	3.83	1440.00	0.58	1.30	3.16	0.76	1.84	4.11	1.69	9.98
Total				26.48	23.11	68.26	22.66	61.33	56.33	22.90	171.64

El sistema de ecuaciones es:

$$28 a_0 + 23.11 a_1 + 68.26 a_2 = 26.48$$

$$23.11 a_0 + 22.9 a_1 + 56.33 a_2 = 22.66$$

$$68.26 a_0 + 56.33 a_1 + 171.64 a_2 = 61.33$$

Resolución del sistema de ecuaciones por el método de mínimos cuadrados

1. Las ecuaciones se expresan en forma matricial y se calcula la matriz inversa

Matriz

$$\bar{a}_3 = \begin{bmatrix} 26.48 \\ 22.66 \\ 61.33 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{matrix} & \mathbf{a}_0 & \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 \\ \begin{bmatrix} 28 & 23.11 & 68.26 \\ 23.11 & 22.9 & 56.33 \\ 68.26 & 56.33 & 171.64 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A^T = \begin{bmatrix} 1.35 & -0.22 & -0.47 \\ -0.22 & 0.26 & 0 \\ -0.47 & 0 & 0.19 \end{bmatrix}$$

2. La matriz inversa se multiplica por el vector a_3 , para obtener los valores de cada variable

$$A^T \bar{a}_3 = \begin{bmatrix} 26.48 \\ 22.66 \\ 61.33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.34 & -0.22 & -0.47 \\ -0.22 & 0.26 & 0 \\ -0.47 & 0 & 0.19 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.272 \\ 0.211 \\ -0.616 \end{bmatrix}$$

3. Finalmente, se obtiene los valores de K, m y n a partir de $y = \text{Log } i$, $a_0 = \log k$, $a_1 = m$, $x_1 = \log T$, $a_2 = -n$, $x_2 = \log(d + c)$, se considera a $c = 0$

$$k = 187.231$$

$$m = 0.211$$

$$n = 0.616$$

4. La ecuación propuesta por Aparicio (1992) es:

$$I = \frac{187.321 * T^{0.211}}{D^{0.616}}$$

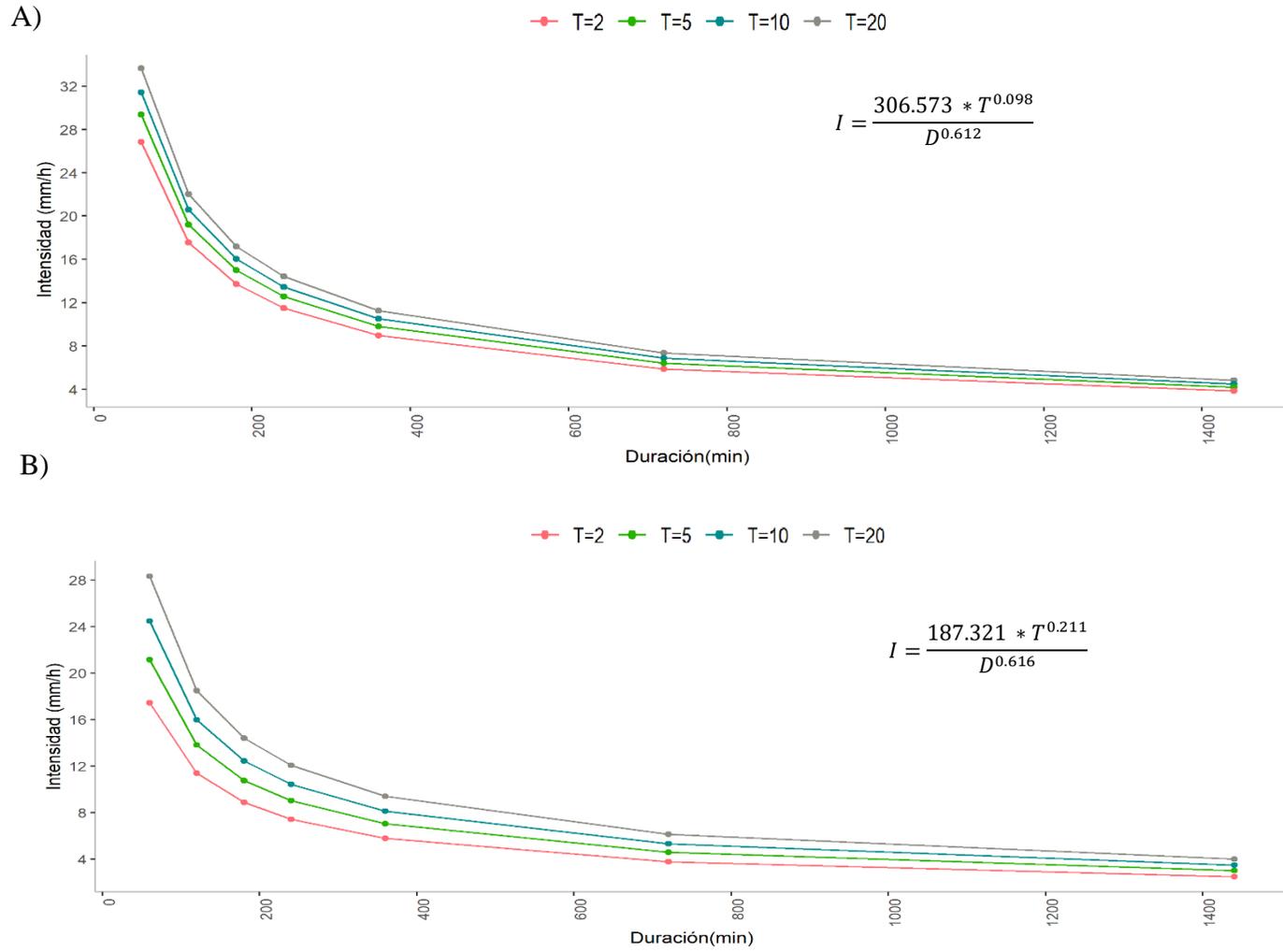


Figura 4. Curvas IDF para A) estación meteorológica y B) producto CHIRPS.

Estimación de caudal mensual y anual

Tabla 14 Caudal máximo mensual (m³/s) estimado a partir del método racional en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Fecha	Precipitación (mm)	Ce	Q (m ³ /s)
Oct-14	316.6	0.08	31.82
Nov-14	149.6	0.06	23.56
Dic-14	87	0.05	20.46
Ene-15	185	0.07	25.31
Feb-15	77.4	0.05	19.98
Mar-15	80.4	0.05	20.13
Abr-15	24.8	0.05	17.38
May-15	34.8	0.05	17.87
Jun-15	89.4	0.05	20.57
Jul-15	255.8	0.08	28.81
Ago-15	205.6	0.07	26.33
Sep-15	325.8	0.09	32.28
Promedio	152.68	0.06	23.71
Min.	24.8	0.05	17.38
Máx.	325.8	0.1	32.28

Nota: Los datos de entrada son: precipitación = valores registrados de la estación meteorológica Lagunas de Montebello, área de la subcuenca = 12091.59469 ha, intensidad = 11.2 mm/h.

Tabla 15 Caudal máximo mensual (m³/s) estimado a partir del método racional en la subcuenca Sistema Lacustre de Planicie, Chiapas.

Fecha	Precipitación (mm)	Ce	Q (m³/s)
oct-14	755	0.14	32.06
nov-14	118.25	0.06	13.18
dic-14	52.59	0.05	11.23
ene-15	28.67	0.05	10.52
feb-15	34.87	0.05	10.71
mar-15	67.62	0.05	11.68
abr-15	4.81	0.04	9.82
may-15	7.31	0.04	9.89
jun-15	21.11	0.05	10.3
jul-15	823.51	0.15	34.09
ago-15	446.23	0.10	22.91
sep-15	1340.5	0.22	49.43
Promedio	308.37	0.08	18.82
Min.	4.81	0.04	9.82
Máx.	1340.5	0.22	49.43

Nota: Los datos de entrada son: precipitación = valores simulados a partir del modelo CHIRPS ajustado, área de la subcuenca = 12091.59469 ha, intensidad = 6.7 mm/h.