



Evaluación de la sequía vegetativa mediante sensores remotos: Estudio de caso en la cuenca del río Chimborazo-Ecuador

Vegetative drought evaluation through remote sensors: A case study in the river basin Chimborazo –Ecuador

Avaliação da seca vegetativa usando sensores remotos: Um estudo de caso na bacia do rio Chimborazo-Ecuador

Carlos Rolando Rosero-Eraza ^I

carlos.rosero1733@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2691-5578>

Andrés Agustín Beltrán-Dávalos ^{II}

a.beltran@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6005-8915>

Jennifer Carolina Cuadrado-Castillo ^{III}

jenny.karo.10@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6216-157X>

Correspondencia: carlos.rosero1733@gmail.com

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

***Recibido:** 19 de abril de 2020 ***Aceptado:** 28 de mayo de 2020 * **Publicado:** 30 de junio de 2020

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba-Ecuador/Universidad Santiago de Compostela, Facultad de Biología, Galicia-España.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba-Ecuador/Universidad Santiago de Compostela, Facultad de Biología. Galicia-España.
- III. Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático, Riobamba-Ecuador.

Resumen

La variabilidad climática en la Cuenca del Río Chimborazo (CRC) presenta adversidades como la sequía y genera un impacto a los sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas. La vegetación en la CRC muestra un estrés hídrico diferenciado tanto en la zona alta y baja, donde, el estratovolcán Chimborazo presenta una influencia directa sobre el estrés hídrico en vegetaciones circundantes. Esta investigación presenta un periodo de análisis entre 1989 al 2018 con la evaluación de siete variables climatológicas utilizadas para la identificación de la transición espacio-temporal de la evapotranspiración potencial en la CRC, la intensidad de precipitaciones mediante el Índice de Precipitación estandarizada (SPI), la distribución temporal del déficit de agua mediante el índice de agua de diferencia normalizada modificada (MNDWI) y la distribución temporal de la sequía mediante la aplicación del índice de estrés vegetativo (VHI). El evento del Niño observado en el periodo 2005-2011 presenta un impacto severo y moderado en las precipitaciones en la CRC según resultados del SPI, siendo el impacto más severo observado en el 2005-2006.

Palabras clave: Sequía vegetativa; evapotranspiración; teledetección; sequía meteorológica.

Abstract

Climatic variability in the Chimborazo River Basin (CRC) presents adversities such as drought and generates an impact on hydrological, ecological and agricultural systems. The vegetation in the CRC shows a differentiated water stress both in the upper and lower zones, where, the Chimborazo stratovolcano has a direct influence on water stress in surrounding vegetation. This research presents an analysis period between 1989 to 2018 with the evaluation of seven climatological variables used to identify the space-time transition of potential evapotranspiration in the CRC, the intensity of precipitation using the Standardized Precipitation Index (SPI), the temporal distribution of water deficit using the modified normalized difference water index (MNDWI) and the temporal distribution of drought by applying the vegetative stress index (VHI). The El Niño event observed in the period 2005-2011 presents a severe and moderate impact on rainfall in the CRC according to SPI results, being the most severe impact observed in 2005-2006

Keywords: Vegetative drought, Evapotranspiration, Remote sensing, Meteorological drought.

Resumo

A variabilidade climática na Bacia do Rio Chimborazo (CRC) apresenta adversidades como a seca e gera impacto nos sistemas hidrológico, ecológico e agrícola. A vegetação na CRC mostra estresse hídrico diferenciado nas zonas superior e inferior, onde o vulcão Chimborazo tem influência direta no estresse hídrico da vegetação circundante. Esta pesquisa apresenta um período de análise entre 1989 e 2018 com a avaliação de sete variáveis climatológicas usadas para identificar a transição espaço-temporal da evapotranspiração potencial no CRC, a intensidade da precipitação utilizando o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), a distribuição temporal do déficit hídrico utilizando o índice hídrico da diferença normalizada modificado (MNDWI) e a distribuição temporal da seca aplicando o índice de estresse vegetativo (VHI). O evento El Niño observado no período 2005-2011 apresenta um impacto severo e moderado nas chuvas na CDC, de acordo com os resultados do SPI, sendo o impacto mais grave observado em 2005-2006.

Palavras-chave: Seca vegetativa, Evapotranspiração, Sensoriamento remoto, Seca meteorológica.

Introducción

El Cambio Climático ha provocado condiciones de sequía extrema en algunas partes del mundo e inundaciones en otras partes (Giesen, Liebe, & Jung, 2010). El resultado de estos cambios en las variables meteorológicas mundiales es debido a las actividades humanas en todo el mundo, por lo que se vieron en la necesidad de implementar modelos de Cambio Climático dentro de un conjunto de escenarios de forzamiento antropogénico (IPCC, 2013). Estos modelos nos brindan una apreciación de las alteraciones de algunas variables meteorológicas, según el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la temperatura media de la superficie global se incrementó en un 0,85 ° C durante el periodo 1880-2012, probablemente por el aumento observado en concentraciones de gases de efecto invernadero generado por las actividades humanas (Giesen et al., 2010). La Frecuencia de precipitación intensa irá incrementándose probablemente en grandes extensiones de territorio durante el siglo XXI, aumentando así el riesgo de inundaciones repentinas, por otro lado, existen pocas mediciones directas de evapotranspiración real en las diferentes coberturas de suelo del planeta

Tierra, mientras que los productos de análisis de alcance mundial incorporar grandes errores, por lo que no son adecuados para el análisis de tendencias, por eso son pocos los trabajos publicados sobre las tendencias observadas de la evapotranspiración, tanto real como potencial (Bates, Kundzewics, Wu, & Palutikof, 2008). La sequía es una condición temporal provocada por la escasez de agua (FAO, 2019) y reducen la disponibilidad de agua para los seres humanos, animales y ecosistemas; afectando directamente a la agricultura, la producción de alimentos y las condiciones socioeconómicas (Uribe, 2015). Uno de los análisis importantes relacionados a lo que podría pasar en un futuro próximo se basa en modelos climáticos de circulación global en base a escenarios de cambio climático, estos escenarios de emisiones son de utilidad para el análisis del cambio climático, la creación de modelos del clima, la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación (IPCC, 2000). La variabilidad climática afecta a cierta escala las condiciones de sequía para cada región del Ecuador y de diferente forma, una de estas variabilidades climáticas como es la Oscilación del Niño, se manifiesta de forma cíclica cada 3 u 8 años, el Niño 1991/92: duró 14 meses, fue el segundo más largo con intensidad moderada, produjo un desastre en la agricultura mundial, el Niño 1994/95 empezó en agosto, septiembre y octubre de 1994, duró siete meses con intensidad moderada y algunas áreas fueron afectadas por sequía moderada, el Niño 2004/05 empezó en agosto-septiembre-octubre de 2004 y duró solo siete meses, fue clasificado de intensidad débil, el Niño 2006/07 fue clasificado de intensidad leve, el Niño 2009/10 su intensidad fue moderada y duró diez meses (Rojas, Li, & Cumami, 2015), el Niño 2015/16 tuvo su desarrollo en el año de 2015 a partir noviembre y diciembre y su debilitamiento en marzo del 2016 (CIIFEN, 2017). El Clima es el factor más importante el cual rige la producción de alimentos en los sistemas socioeconómicos y ambientales relacionados con la disponibilidad de igual forma con los recursos hídricos (Djaman, Balde, Rudnick, Ndiaye, & Irmak, 2017). La sequía meteorológica es definida como un déficit de precipitación con una gran pérdida de agua hacia la atmosfera (Vásquez, Ventura, & Acosta, 2011), por otro lado la sequía agrícola se relaciona principalmente con la disponibilidad de humedad del suelo para las plantas (Mannocchi, Todisco, & Vergni, 2004), mientras que la sequía hidrológica se relaciona con deficiencias en los niveles del lago y del flujo de avenidas (Overpeck & Trenberth, 2003).

El índice de precipitación estandarizada (SPI) ha sido usado para monitorear la sequía meteorológica por su facilidad de uso a diferentes escalas temporales (Thomas B. McKee, 1993),

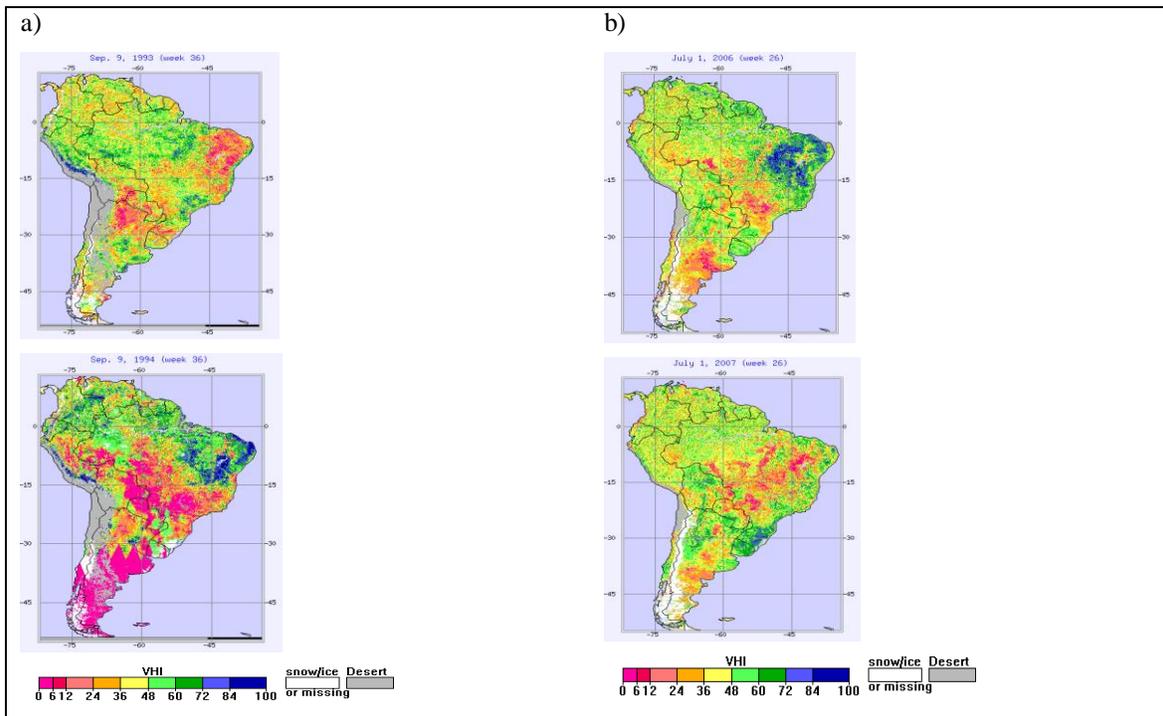
siendo un indicador adoptado para la evaluación de la intensidad de la sequía debido a su simplicidad, la aplicación de este indicador está fuertemente limitada por su naturaleza inherente de dependencia media, las desviaciones de las precipitaciones no pueden aplicarse de manera uniforme en diferentes áreas con precipitaciones medias variables, un área de baja precipitación pueden tener la misma desviación de lluvia para dos cantidades diferentes de lluvia real por lo que se debe tener cuidado al momento de las interpretaciones en estos espacios de lluvia (Naresh, Murthy, Sessa, & Roy, 2006). El uso tanto del SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y SPEI (Índice de precipitación evapotranspiración estandarizado) muestran un buen comportamiento de datos frente a la detección de impactos en sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas (Serrano et al., 2010).

Por otro lado está el índice estandarizado de nivel de agua (SWI) el cual se ha desarrollado para analizar sequía hidrológica a partir del déficit de recarga de agua subterránea a los sistemas lacustres (Mishra & Nagarajan, 2013), complementariamente autores como (Bhuiyan, Singh, & Kogan, 2006) han aplicado en sus investigaciones de sequías vegetativas índices basados en teledetección como por ejemplo: El Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI), Índice de Condición Vegetal (VCI), Índice de condición de temperatura (TCI) e Índice de Salud de la Vegetación (VHI), esta última, indica el estrés de la vegetación causado por factores climáticos e hidrológicos (Kogan,2002). Una de las condicionantes para obtener este factor de estrés vegetativo es la generación de índices de Vegetación como es el caso del índice de vegetación mejorado (EVI) el cual fue optimizado a partir del NDVI para reducir la influencia de la atmósfera, este índice es más apropiado para zonas con escasa cobertura vegetal, suelo desnudo y permite monitorear el estado de la vegetación en altas densidades de biomasa (GWP & WMO, 2016), como se representa el edafopaisaje de la cuenca del Río Chimborazo. El sistema mundial de información y alerta sobre la alimentación y la agricultura (SMIA) inspecciona el estado de los principales cultivos alimentarios, por medio de métodos utilizados en teledetección ya que estos proveen información importante sobre la disponibilidad del agua y la salud vegetal durante los periodos vegetativos, el SMIA y la FAO desarrollaron el Índice de Estrés Agrícola (ASIS) que utiliza datos de teledetección por satélite para monitorear zonas agrícolas con alta probabilidad de estrés hídrico y sequía, a nivel global a través de tecnología satelital (FAO, 2020b). ASIS evalúa: la severidad (intensidad, duración y extensión espacial) de la sequía agrícola , monitorea el fenómeno del Niño en el cual los patrones habituales de precipitaciones y

circulación atmosférica se ven alterados provocando episodios climáticos extremos en distintos lugares del planeta: sequías, inundaciones y cambios en la intensidad y frecuencia de los huracanes; afectando principalmente a la agricultura, ASIS integra el Índice de Salud de la Vegetación (VHI, siglas en inglés) en dos dimensiones para evaluar el episodio de sequía enfocado a las zonas agrícolas en el tiempo y el espacio (Rojas, Li, & Cumani, 2015). El primer paso para calcular el ASIS consiste en determinar la media temporal del VHI, evaluando la intensidad y frecuencia de los períodos secos que se producen durante el ciclo de cultivo a nivel de píxel, es decir, ASIS utiliza coeficientes de cultivo (kc) para modelizar mejor la sensibilidad o estrés hídrico de cada fase fenológica del cultivo, claro está, brindando mayor importancia a la floración del cultivo (FAO, 2015). El segundo paso radica en identificar la extensión de las sequías calculando el porcentaje de píxeles en zonas cultivables con un VHI por debajo del 35 %, según Kogan (1990) identificó este valor como umbral crítico para evaluar el alcance de una sequía (FAO, 2020a). Desde los años ochenta se han desarrollado índices de vegetación para evaluar diferentes eventos ambientales y ecológicos y a partir de los datos de teledetección del satélite Landsat 7, presenta 8 bandas en total: tres en el Espectro Visible (B1, B2 y B3); una en el Infrarrojo Cercano (B4); dos en el IR Medio (B5 y B7); una en el IR Térmico (B6); y una banda pancromática (B8) se pueden identificar un sin número de índices (Kogan, 1990).

Mediante observación del VHI en un espacio Regional durante el periodo entre 1993 y 1994 (Figura 1, a) en la región sudamericana se observan zonas por debajo del 20 por ciento ($VHI < 20$) con un indicio crítico de estrés vegetativo, y dada su distribución espacial se estima que el impacto de una sequía severa pudo haberse dado en el Sur del Ecuador Continental (Figura 1,a). Según el Índice VHI durante el año 2006 la parte este de la región sudamericana (Figura 1,b) se observa zonas con ($VHI > 60$) que no presentaban sequía y que su producción pudo haber sido abundante; en comparación con el año 2007, la región sudamericana se vio afectada por una sequía moderada que tendía a volverse severa ($10 < VHI < 40$) debido a poca lluvia y el estrés hídrico un indicio crítico de estrés vegetativo, por lo cual se estima que en este periodo hubo pérdidas en los cultivos y pastizales.

Figura 1: Imagen de NOAA STAR



Fuente: ([https:// www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php))

Como se observa los patrones tanto de VHI para el Ecuador continental presentan dos impactos diferentes tanto para la zona Norte como para la zona Sur, hay que tomar en cuenta los entornos de montaña ya que la lluvia puede ser extremadamente variable en el espacio y tiempo (Buytaert, Celleri, Willems, De Bievre, & Wyseure, 2006) y de igual forma las variaciones en condiciones climáticas oceánicas la cual afecta periódicamente con precipitaciones durante los eventos del Niño (Gasparri, Tassara, & Velasco, 1999), claramente influenciadas por el movimiento de la ZCIT, las depresiones o borrascas sudamericanas y zonas de anticiclones (Pourrut, 1983).

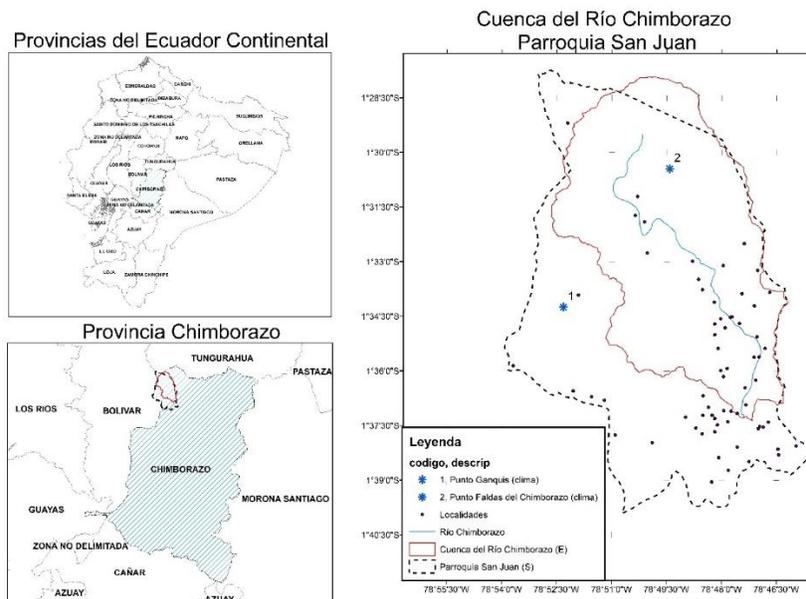
La presente investigación realiza una caracterización climática a partir de bases de datos satelitales para comprender los fenómenos climatológicos ocurridos en la zona, la sequía vegetativa nos brindará un acercamiento al riesgo local presente en la Cuenca del Río Chimborazo (CRC), es necesario optar por una aproximación a las condición de estrés vegetativo presente en la zona por lo que es prescindible obtener una información adecuada en torno a cada uno de estos índices de sequía propuesto en la investigación, el SPI obtenido en dos coordenadas de la cuenca del Río Chimborazo brinda un acercamiento a las diferentes condiciones

meteorológicas (precipitación) presente dentro de un periodo de tiempo adecuado, por otro lado la caracterización de datos meteorológicos sumado a la caracterización del lugar mediante técnicas basadas en teledetección fortalecen la identificación de este tipo de riesgo el cual brinda un importante impulso para la identificación de impactos en los sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas.

Metodología

La investigación de carácter descriptivo exploratorio se realizó en la cuenca del río Chimborazo perteneciente a la Unidad Hidrográfica nivel 5 Chambo, ubicada en la Provincia del Chimborazo, dentro de la cordillera de los Andes centro del Ecuador. Para la presente investigación se identificaron 2 puntos geográficos para la recolección de datos climatológicos debido a su accidentada topografía, el primer punto representado por una zona baja de la CRC llamada “Ganquis” tiene por coordenada en Latitud: -1.570677 , longitud: -78.871968 y altitud: 3647msnm , por otro lado el segundo punto de la CRC llamada “Faldas del Chimborazo” tiene por coordenadas en la Latitud: -1.507296 , Longitud: -78.8236 y Altitud: 4367msnm (Figura 2).

Figura 2: Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Autores, 2020

Índice de precipitación estandarizado

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de la plataforma <https://power.larc.nasa.gov/>, estos se descargaron para los dos puntos de referencia, tanto para la zona baja y la zona alta de la CRC (Figura 2). Para la estandarización de las anomalías pluviométricas mensuales acumuladas se utilizó el Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) que permite diferenciar a nivel mensual los periodos secos y húmedos (Edwards & McKee, 1997), donde primero se calculó la anomalía pluviométrica de cada uno de los meses de la serie, seguido del cálculo de las anomalías pluviométricas acumuladas, desde el primer mes de la serie, y la estandarización de las anomalías acumuladas mediante su conversión en puntuaciones o índices, este análisis fue previo a la obtención de imágenes satelitales para realizar la comparativa entre los periodos tanto lluviosos y secos en la CRC.

Las imágenes LandSat utilizadas en la presente investigación fueron: LandSat 5 (15/10/1991), Landsat 7 (31/07/2007) LandSat 8 (20/11/2016), la decisión de obtener estas imágenes fue en función de los resultados del SPI.

Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado

Este índice es muy utilizado para el control del riego en tiempo real mejorando significativamente las actividades agrícolas, por lo que se analizaron tres imágenes satelitales de LandSat 5, 7 y 8 respectivamente cubriendo la totalidad de la zona de estudio y aplicando el método propuesto por Xu, (2006), que contempla una sistemática análoga a la de McFeeters (1996). En este caso, la relación entre bandas no contempla el manejo de la banda NIR sino la SWIR, y esta es más conocida como el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado o MNDWI (Xu, 2006).

$$1) \text{MNDWI}(\%) \text{LandSat } 5, 7 \text{ y } 8 = 100 \times \frac{(\text{Green} - \text{SWIR})}{(\text{Green} + \text{SWIR})}$$

Donde: Green = Banda 3 y MIR = Banda 6 para LandSat 8, mientras que para LandSat 5 y 7; Green= Banda 2 y MIR = Banda 5

Índice de Sequía Vegetativa Local

Mediante el EVI2 se determinó la condición de respuesta a la biomasa presente en la CRC, mediante la Banda 4 y Banda 5 para LandSat 8 y la Banda 3 y 4 para LandSat 8 respectivamente, mejorando y optimizando la señal de vegetación con sensibilidad a la biomasa (INTA, 2002). Mediante la aplicación de la siguiente ecuación se determinó el Índice de Vegetación Mejorado:

$$2) \text{EVI2 (\%)}_{\text{LANDSAT 5,7 y 8}} = 100 * \left(2.5 * \left(\frac{(NIR-R)}{((NIR+2.4)*(R+1))} \right) \right)$$

$$3) \text{VCI(\%)} = 100 * \left(\frac{(EVI2_{max} - EVI2)}{(EVI2_{max} - EVI2_{min})} \right)$$

Dónde EVI2 es el valor del índice de vegetación mejorada; NIR= Infrarrojo y R= Rojo.

Para la ecuación 2 el VCI (%) es el índice de condición vegetal se usó: EVI2, EVI2min y EVI2max son estacionales promedio de EVI2. Hemos tomado directamente imágenes Landsat de la USGS en tres estacionales correspondientes tanto para los años 1991/10/15, 2007/07/31 y 2016/11/20. (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

$$4) \text{TCI} = 100X \left(\frac{(BT_{max} - BT)}{(BT_{max} - BT_{min})} \right)$$

BT, BTmin y BTmax son similares valores de temperatura de brillo (Kogan, 2001), donde BT, BTmin y BTmax son el promedio estacional de temperatura de brillo semanal, su absoluto multianual mínimo y máximo, respectivamente. Y por último el VHI está calculado por la siguiente expresión:

$$1. \text{VHI} = 0,5(\text{VCI}) + 0,5(\text{TCI})$$

Tabla 1: Índice de Precipitación estandarizada (SPI), Índice de Salud de la Vegetación (VHI) e índice estandarizado de nivel de agua (MNDWI).

Clases de sequía	SPI (McKee et al.,1993)	MNDWI (Xu, 2006)	VHI (Kogan, 2002) Modificado.
Sequía Extrema	< - 2.0	<-80	< 10
Sequía Severa	< - 1.5	-20 a -80	< 20
Sequía Moderada	< -1	-20 a 20	< 30
Sequía Ligera	< 0.0	20 a 80	< 40
Sequía Nula	> 0.0	> 80	> 40

Fuente: Bhuiyan et al, 2006

Evapotranspiración.

En el análisis de la Evapotranspiración refleja condiciones meteorológicas que ayudarán a la aproximación de las condiciones de sequía en la zona de estudio, debido a ello y para robustez de la interpretación se aplicará 16 métodos empíricos para el cálculo promedio de la evapotranspiración potencial. A partir de la base de datos de POWER NASA en las coordenadas -1.589569, -78.880098 se descargaron 6 variables climatológicas: temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, Velocidad del viento, precipitación y radiación solar incidente, que dieron lugar a la presente investigación (<https://power.larc.nasa.gov/>).

Tabla 2: Métodos Empíricos para el Cálculo promedio de la Evapotranspiración

Método	Fórmula
<i>Método de Thornthwaite</i>	$ETP = 16 (10T/I)^a$
<i>Método de Hargreaves_01</i>	$ET_o = 0,0023(T_{media} + 17,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5} R_o$
<i>Método de Christiansen</i>	$ETP = 0.324 R_{xt} C_w C_H C_t C_s C_e$
<i>Método de Penman Monteith</i>	$ETP = f \times E_o$ $E_o = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right) + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \times f u_2 \times (e_s - e_a)$
<i>Método de Penman Modificado</i>	$\frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$
<i>Método de Turc</i>	$ETP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) (RG + 50) \left(\frac{1 + 50 - HR}{70} \right)$
<i>Método de Jensen - Haise</i>	$ETP = R_s (0,025 * T_m + 0,08)$
<i>Método de Stephens - Stewart</i>	$ETP = 0,01476 (T + 4,09) \frac{MR_s}{b}$
<i>Método de Linacre</i>	$ETP = \frac{\left(\frac{500 T_m}{100 - A} \right) + 15 (T - T_d)}{80 - T}$
<i>Método de Papadakis</i>	$ETP = 5,625 (e_{max} - e)$
<i>Método de la Radiación</i>	$ETP = c (w + R_s)$
<i>Método de Serruto</i>	$ETP = 0,0025 R_s (T_{mean} + 16,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5}$
<i>Método de Priestley - Taylor</i>	$ETP = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right)$

Método de Makkink

$$ETP = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_s}{2,45} \right) - 0,012$$

Método de Valiantzas

$$ET_0 = 0,05 (1 - \alpha) R_s \sqrt{T + 9,5 - 0,188(T + 13) \left(\frac{R_s}{R_a} - 0,194 \right) (1 - 0,00015 (T + 45)^2) - 0,0165 R_s u^{0,7} + 0,0585(T + 17) u^{0,75} \times \frac{(1 + 0,00043(T_{max} - T_{min}))}{(1 + 0,00043(T_{max} - T_{min}))}$$

Método de García - López

$$ETP = 1,21 * 10^{11} (1 - 0,01 HR) + 0,21 T - 2,3$$

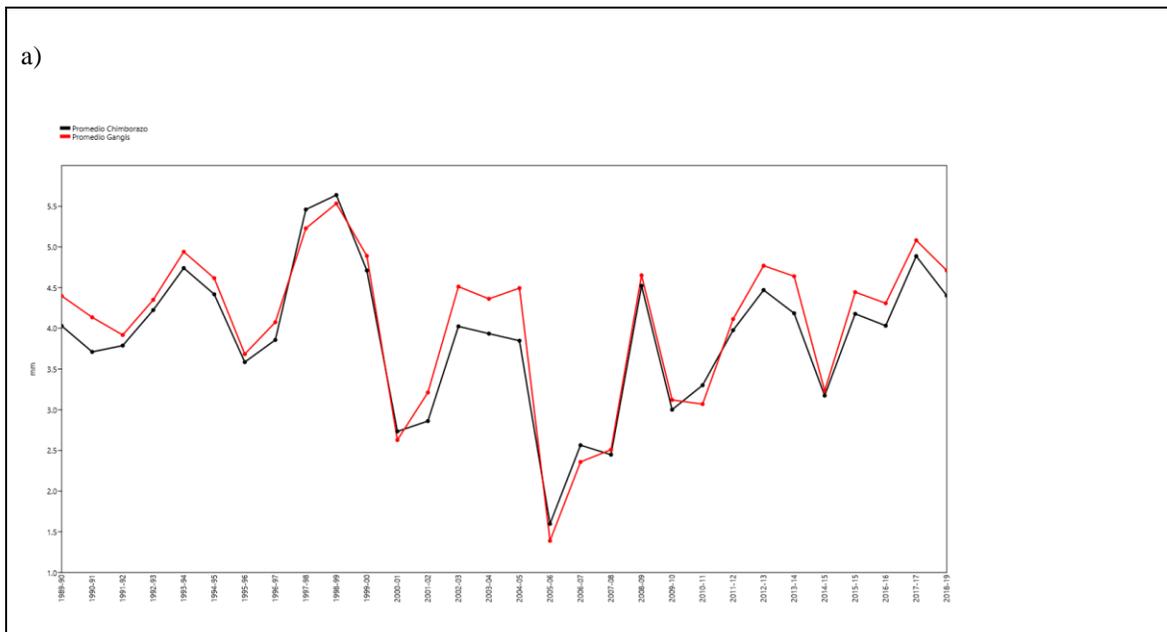
Fuente: Autores, 2020

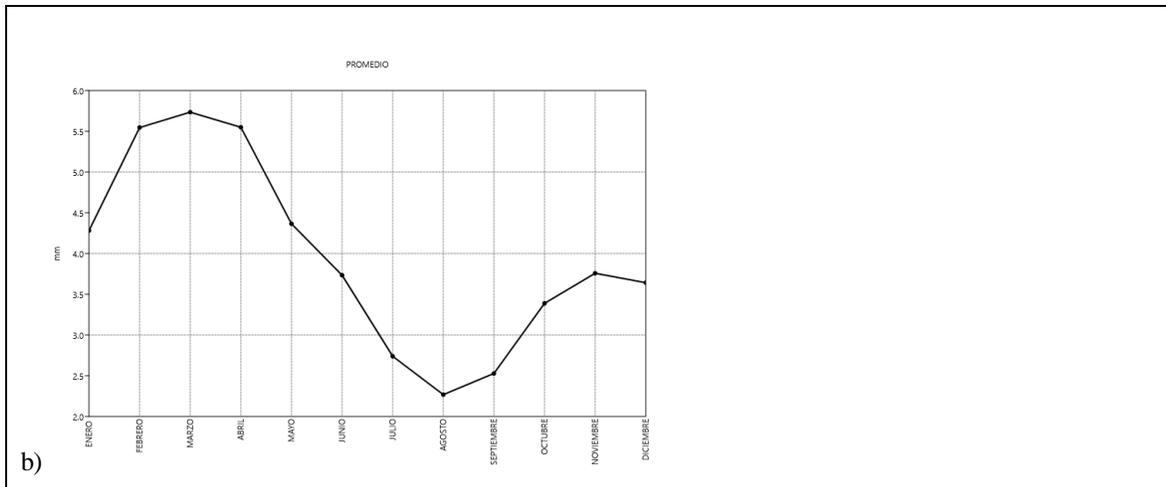
Resultados

Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).

La precipitación en la Cuenca del Río Chimborazo (CRC) de dos puntos ubicados en la zona de Ganquis (Figura 3, a) y en las faldas de Chimborazo (Figura 3, b) muestran relación en sus variaciones a excepción de un año 2001-2002, donde, se observa una leve disminución de precipitación en las faldas del Volcán Chimborazo en comparación a la zona baja de la CRC la cual afecta al análisis de SPI (Figura 3, a).

Figura 3: Comportamiento promedio de la precipitación para el periodo 1989-2018



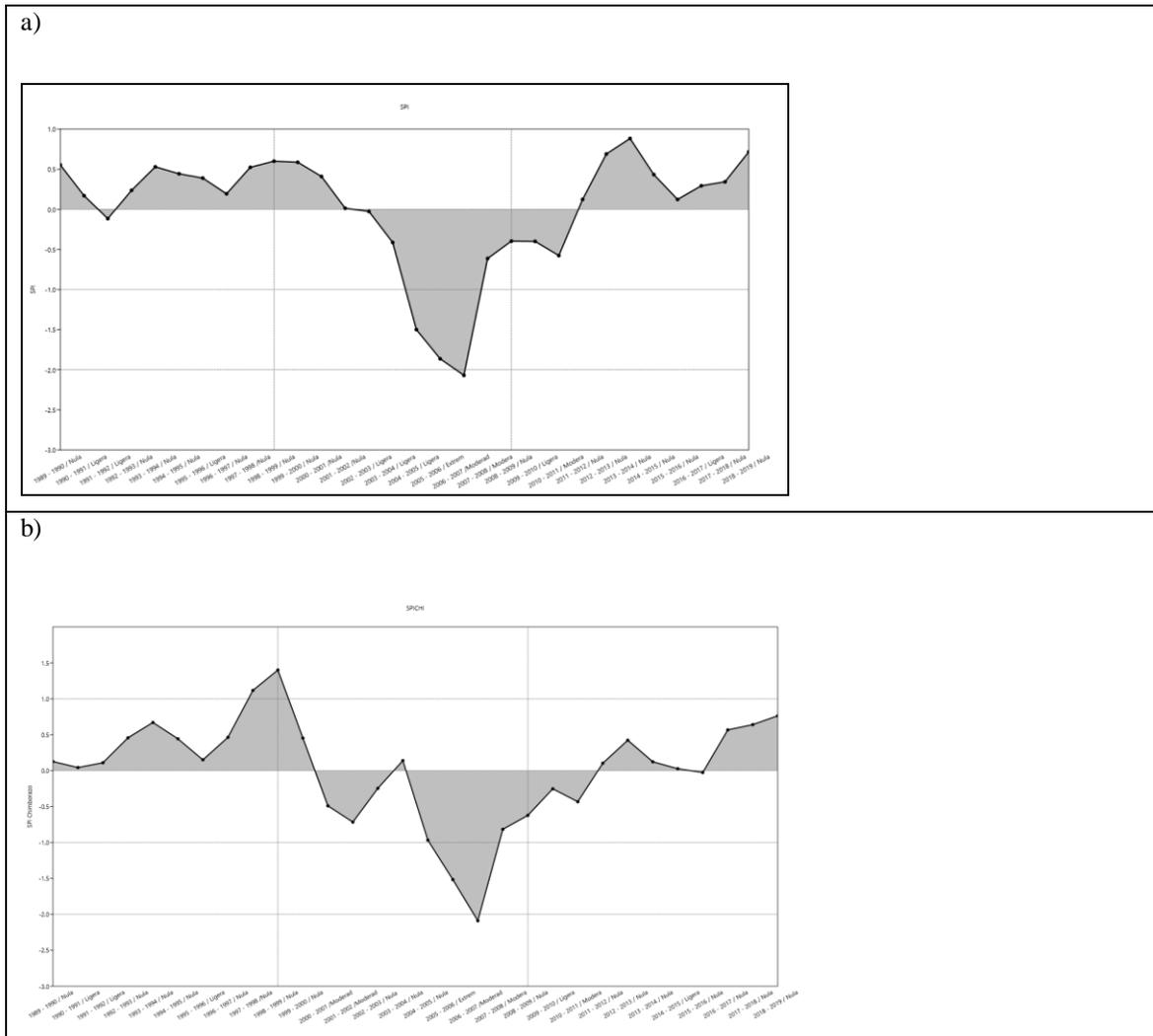


Fuente: (<https://power.larc.nasa.gov/>), Software DRINC (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2015)

Para el periodo (1989-2018) y las zonas de análisis (Ganquis y Chimborazo) en promedio tenemos una época lluviosa establecida por precipitaciones sobre los 4mm en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo, mientras que, para los siguientes meses de Junio a Diciembre tenemos precipitaciones inferiores a los 4mm (Figura 3, b).

Consideremos los dos puntos de obtención de la información para la caracterización del SPI en la CRC, en la zona baja representada por Ganquis obtenemos un periodo de sequía meteorológica extrema dada en el periodo de 2005-2006 el cual se prolongó hasta el año 2008 con sequías moderadas, anterior a la sequía extrema en la CRC se presentaban datos normales entre sequías Nulas y Ligeras, posteriormente a estos datos encontramos un periodo de sequía moderada en el año 2010-2011 el cual hasta la fecha de análisis no se vuelve a presentar (Figura 4, a). Por otro lado, en la zona alta de la CRC nos encontramos con la misma variación de sequía extrema presentado en el mismo periodo de 2005 a 2006, por otro lado, se encontró una anomalía en los datos presentados en relación a los datos de la zona baja de la CRC, el cual generó un periodo más de sequía detallada como “sequía moderada”, la cual se presentó en el periodo 2000-2002 (Figura 4, b).

Figura 4: SPI para la zona alta y la zona baja de la CRC

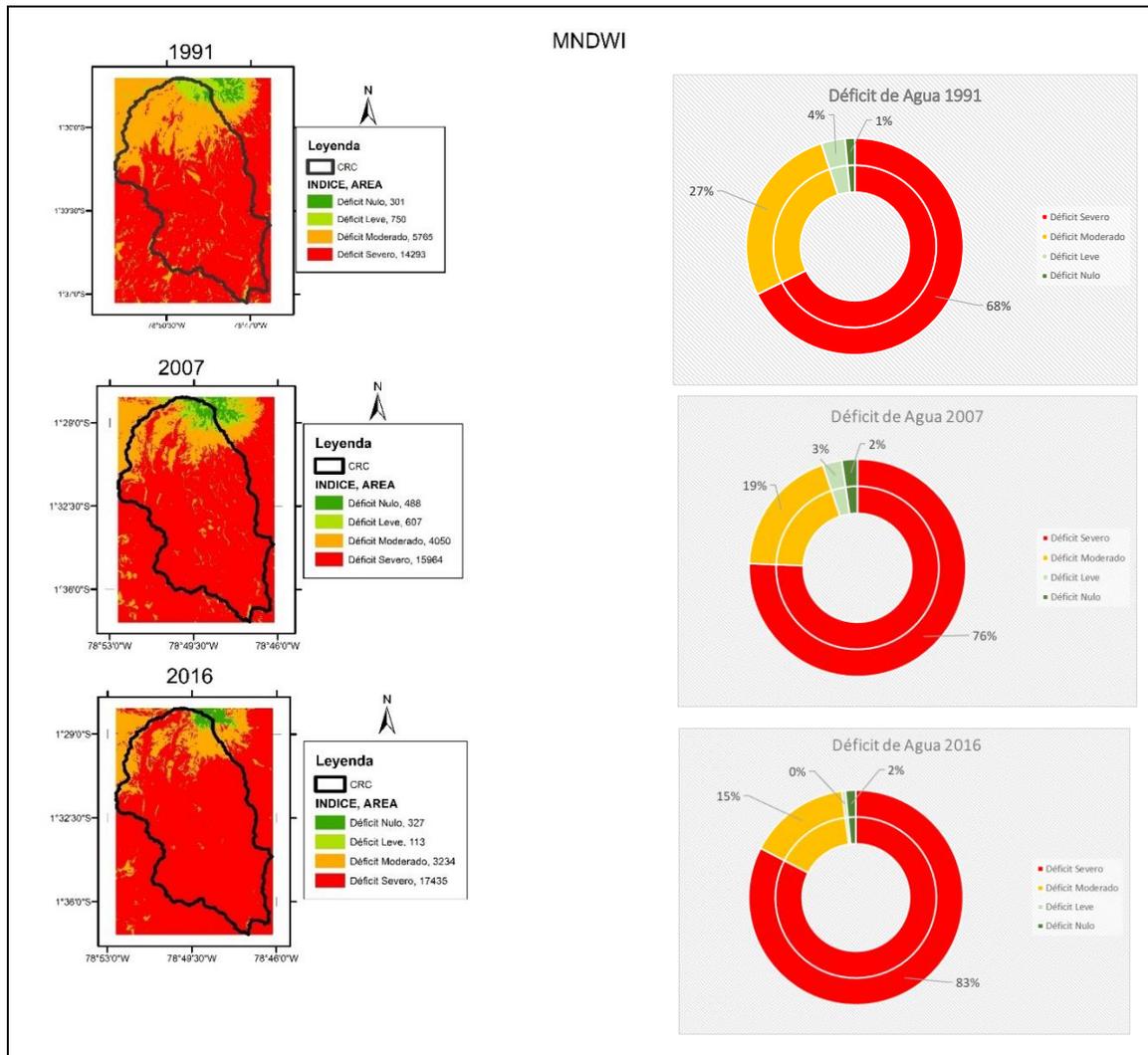


Fuente: (<https://power.larc.nasa.gov/>), Software DRINC (Tigkas, Vangelis, & Tsakiris, 2015)

Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado realiza una identificación de las zonas con presencia de humedad, esto puede ayudarnos a dar una idea sobre las condiciones de estrés hídrico en la zona relacionando las bandas (Green, MIR y SWIR) de LandSat 5, 7 y 8. Esta caracterización del territorio nos brinda el estado de humedad de la cobertura de suelo presente en la zona, para la presente investigación se observa el déficit de agua para la CRC.

Figura 1: Índice de agua de diferencia normalizada modificada para la Cuenca del Río Chimborazo.

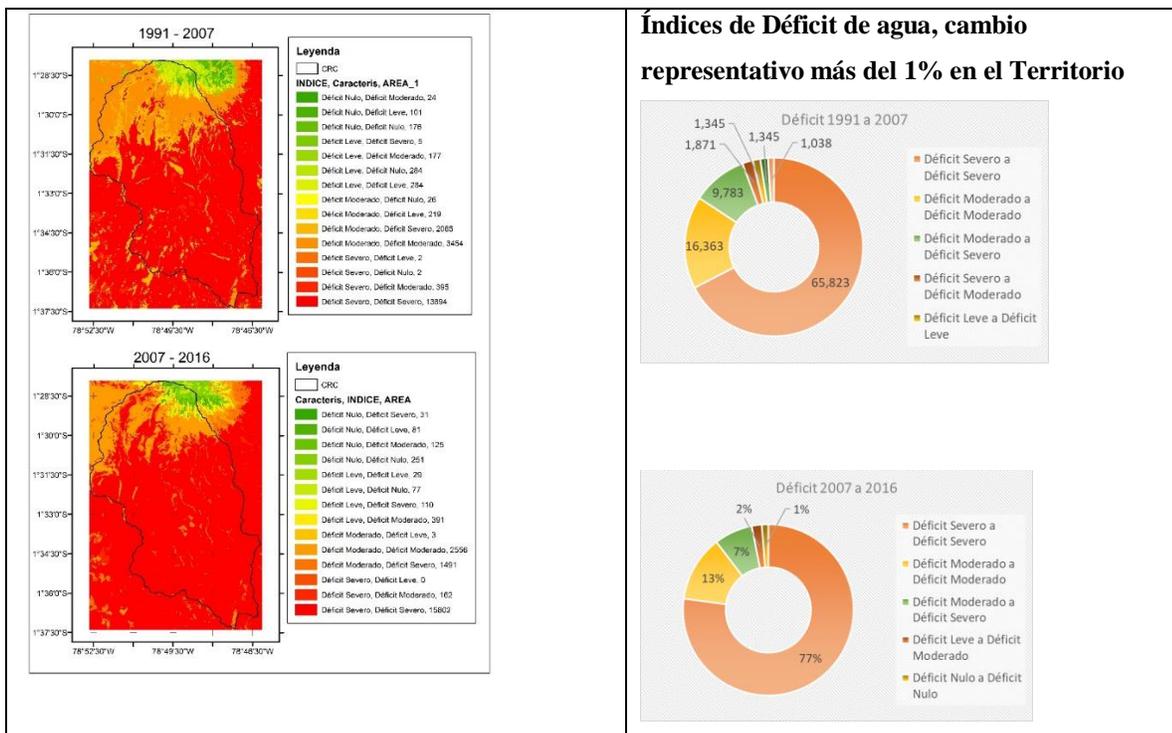


Fuente: Autores, 2020

En general la CRC presenta para los años 1991, 2007 y 2016 condiciones de déficit de humedad Severos, Moderados, Leves y Nulos los cuales presentan un patrón de distribución espacial que subyace a las condiciones de estrés vegetativo en la CRC. En la CRC el Déficit de agua severo ha ido incrementando sus niveles en superficie hasta llegar a cubrir el 82.60% del área de estudio, por otro lado, condiciones de Déficit de Agua Moderadas y Leves han ido decayendo en el tiempo, por último, las condiciones de Déficit Nula se mantienen inapreciables en el tiempo y el espacio, este patrón de distribución se observa en el estratovolcán Chimborazo y sería este último un factor fundamental para la presencia de humedad en la cobertura de suelo en la zona Norte de la CRC. Para el año 1991 se tuvo una superficie en la CRC con Déficit Severo del 67.71%

seguido de un Déficit de Agua Moderado con el 27.31%, posteriormente un Déficit de Agua Leve con un 3.55% y por último un Déficit Nulo del 1.43%. Para el año 2007 tenemos dos Déficit de Agua que aumentan en extensión en relación al año 1991, el Déficit de Agua Severo con un 75.63% del territorio y el Déficit Nulo con un 2.31%, por otro lado, el Déficit Moderado (19.19%) y Leve (2.88%) disminuyen en relación al año 1991. Para el año 2016 existe un incremento en condiciones de Déficit de Agua Severo en un 82.60% del territorio de la CRC, mientras que para condiciones con Déficit Moderado (15.32%) y Déficit Leve (0.54%) se presenta descensos en su extensión y modificaciones en su distribución, por último, podemos mencionar que el Déficit Nulo es inapreciable para cada uno de los años en cuestión (Figura 5). El Estratovolcán Chimborazo presenta una importancia relevante como modulador de condiciones de Déficit de Agua en la zona Norte de la CRC.

Figura 2: Déficit de agua representado por el MNDWI 1991-2007 y 2007-2016



Fuente: Autores, 2020

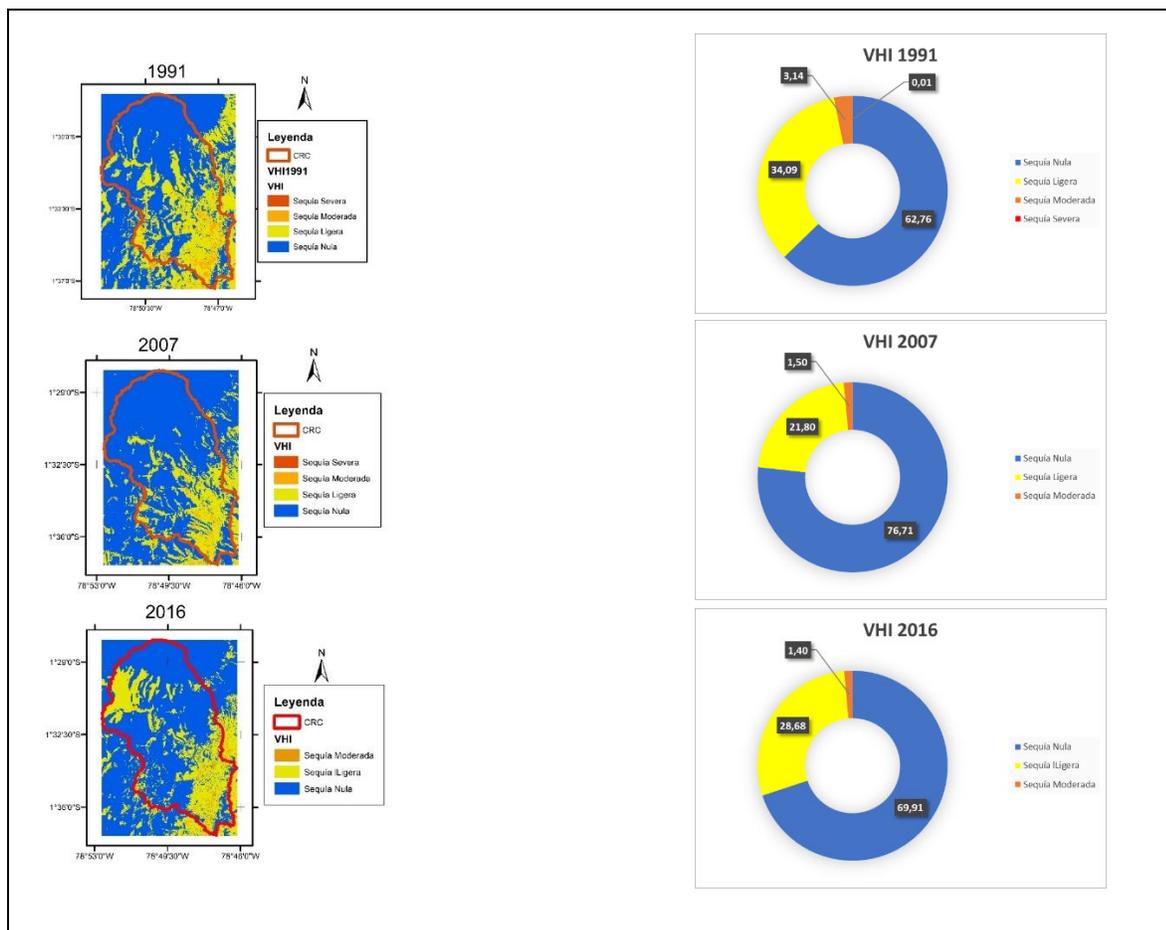
La CRC presenta dos periodos de análisis de déficit de agua (1991-2007 y 2007-2016). En este análisis se observa un incremento del déficit severo del 66% observado en el periodo 1991-2007 al 77% en el periodo 2007-2016. Se puede observar que los déficits severos de agua en la parte

sur de la CRC comienzan a incrementarse, disminuyendo así el área abarcada por los déficits moderados (Figura 6).

Índice de Sequía Vegetativa (Local)

El índice de sequía vegetativa (VHI) muestra características importantes de estrés de la biomasa presente en la CRC, a partir de índices mejorados de vegetación (EVI2) y la respuesta de la temperatura de brillo (BT) de la banda térmica permiten establecer: la condición de la temperatura (TCI) y las condiciones de la vegetación (VCI).

Figura 3: Sequía Vegetativa en la Cuenca del Río Chimborazo-Parroquia San Juan-Chimborazo

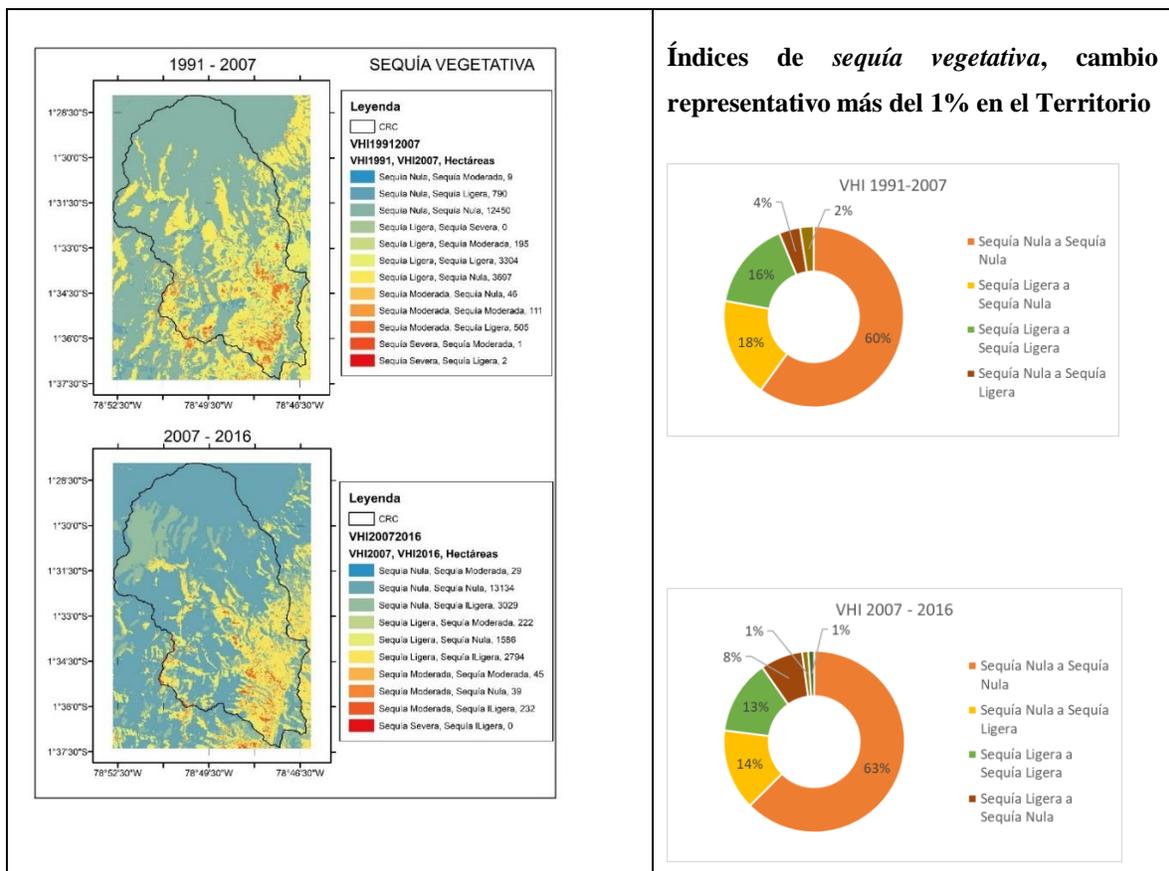


Fuente: Autores, 2020

La CRC presenta para el año 1991 cuatro tipos de condiciones de VHI, siendo este el único año donde se presenta condiciones de Sequía Severa, este parámetro tiene una extensión inapreciable

en la zona de estudio debido a que solo ocupa el 0,01% de su territorio, por otro lado, la sequía moderada presenta una disminución del 3.14% al 1.40% desde 1991 al 2016 mientras que la sequía Ligera se presenta un patron oscilante entre los tres años, siendo el año de 1991 donde se encontraba mayor extensión de Sequía Ligera con un 34% del territorio de la CRC, en el 2007 disminuye la extensión de este tipo de sequía a un 21.80% y para el 2016 aumenta en 28.68%. Por último se observa la Sequía Nula que presenta de igual forma para el año 2007 su maxima extensión con el 76.71% del territorio que abarca la CRC, pero para el año 1991 se presentaba una extensión del 62.76% y para el año 2016 un 69.91% (Figura 7). Se puede apreciar un patrón oscilante entre las condiciones de sequía vegetativo y un desplazamiento de sequías ligeras hacia la zona nort-oeste de la CRC manteniendo este patron en la zona sur-este.

Figura 4: Índices de sequía entre periodos 1991-2007 y 2007-2016



Fuente: Autores, 2020

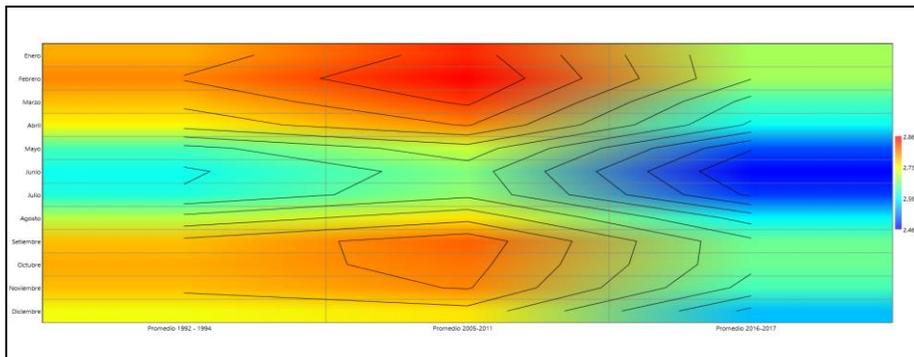
Las condiciones de sequía Nula en el periodo de 1991 al 2007 se mantienen en una extensión del 59% de la CRC, siendo el único cambio presente de esta condición Nula a Ligera en un 3.74% de su extensión, por consiguiente, la sequía Ligera en la CRC se mantiene en un 15.65% del territorio siendo así el único cambio presente de esta condición ligera a Nula con un 17.51%, por último en este periodo se puede observar un cambio leve de la condición de Sequía Moderada a Sequía Ligera de un 2.39% de su extensión (Figura 8). Las condiciones de Sequía para el periodo de 2007 a 2016 se mantiene una Sequía Nula en un 62.22% de la extensión de la CRC, siendo el cambio para esta condición de Sequía Nula a Ligera representada con un 14.35% del territorio, siendo así una condición apreciable en la zona de estudio, por otro lado, la Sequía Ligera que se mantiene desde el año 2007 al 2016 es del 13.24% siendo tan solo perceptible un cambio de Sequía Ligera a Sequía Nula en este periodo del 7.51% del territorio, por último en este periodo de análisis (2007-2016) se percibe cambios mínimos inapreciables de un 1% entre condiciones de Sequía Moderada a Ligera y viceversa. Siendo así el periodo 2007-2016 considerado el de mayor impacto por cambios e incremento en la distribución de la Sequía Vegetativa (Figura 8).

Evapotranspiración

La sequía en la Cuenca del Río Chimborazo fue un periodo largo de 6 años (2005 - 2011) donde hubo una disminución de las precipitaciones y se registraron valores de Evapotranspiración de 2 a 3 mm/día ; como manifiesta el (Ministerio del Ambiente, 2012) ocasionó pérdidas en los cultivos, al sistema productor y socioeconómico de la parroquia San Juan, ya que los cultivos no llegaron a su producción normal por los efectos derivados en las variaciones climáticas, en el periodo de 2002 al 2007, las sequías causaron el 45% de las pérdidas en los cultivos transitorios y 11% en cultivos permanentes. La ausencia de lluvias entre septiembre 2009 y enero 2010 afectó aproximadamente al 98% del área cultivada de Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar y Chimborazo, al tiempo que el 2% fue declarado como pérdida total.

En el periodo de 1992 a 1994 la evapotranspiración fue menor en comparación a los períodos posteriores (Figura 9). Se observa mayor evapotranspiración en el periodo 2005 a 2011, debido al aumento de las temperaturas y la escasa precipitación durante ese periodo en la zona.

Figura 9: Evapotranspiración Potencial Promedio de 16 métodos empíricos por periodo



Fuente: Autores. 2020

Discusión

Si bien es cierto uno de los factores para determinar la sequía vegetativa son las variaciones en la longitud de onda electromagnética que refleja cada tipo de coberturas de suelo, en investigaciones pioneras para la caracterización de la vegetación se usa el NDVI en logaritmos para identificar el VHI propuesto por Kogan 2002, en la presente investigación se modifica el logaritmo y se usó el EVI2 ya que este índice optimiza las características de biomasa presente reduciendo la interferencia de ciertos factores atmosféricos. Las precipitaciones en la zona alta de la CRC se diferencian por una leve discontinuidad de los datos en el año 2001-2002 lo cual provoca una diferencia en la distribución temporal de la sequía meteorológica generando así un periodo más de sequía en la zona alta de la CRC, por otro lado, se presentan distribuciones del estrés hídrico Severo en la zona baja de la CRC, mientras que, para la zona alta se distribuyen Déficit de Agua moderado, leve y nulo, claramente el estrés hidrológico severo presente en la zona en el tiempo ha ido abarcando las zonas con sequía moderada. Cuando mencionamos por otro lado la sequía vegetativa, en cambio, se observa la condición más severa observada entre los años 1991, 2007 y 2016 se presenta en el año 1991, esto no quiere decir que la sequía ha disminuido en la CRC ya que esta condición tiene un área de influencia reducida en la CRC, lo que sí es distinguible es un patrón de distribución de la sequía Ligera hacia la zona norte-este de la CRC. Para la Presente investigación se tomó en cuenta la fecha de obtención de las imágenes debido a la existencia de dos periodos lluviosos marcados en el año, además, la condición de sequía meteorológica existente en tal fecha también juega un papel relevante para la reducción de errores en las interpretaciones de resultados. La oscilación del Niño produce un aumento en la

temperatura atmosférica y la precipitación en la región litoral ecuatoriana, mientras que el viento (velocidad - dirección) influye en las demás regiones del país, en esta investigación descartó procesos convectivos locales generados por la estabilidad o inestabilidad atmosférica, la oscilación del Niño se manifiesta de forma cíclica cada 3 u 8 años (CIIFEN, 2017), el índice estandarizado de precipitación guarda una relación con la oscilación del Niño en ciertos periodos de forma tal que aumenta o disminuye las precipitaciones, observaciones en los años 1991, 1992, 1994 y 1995 el Evento del Niño fue identificado con categoría MODERADO el cual no guarda relación con las variaciones de precipitación observado en el SPI ya que en este periodo las sequías meteorológicas se encuentran entre Ligeras y Nulas, la oscilación del Niño del 2004, 2005, 2006 y 2007 fue catalogado LEVE, y la del 2009 descrito como MODERADO, está en cambio tiene una relación debido que es donde inicia el periodo de sequía más relevante en la CRC dando lugar a una sequía extrema nunca vista en el año 2005-2006 tanto para la zona alta y baja de la CRC.

Conclusiones

El análisis a partir de índices estandarizados con datos meteorológicos de la NASA y el análisis geofísicos de imágenes LandSat 8 y LandSat 7 permitió identificar la hipótesis que relaciona la sequía meteorológica (SPI), la evapotranspiración y los factores físicos como la presencia y variación del estrés vegetativo en tres años (1991, 2007 y 2016) bajo condiciones diferentes de precipitación según el SPI. La sequía surge en la Cuenca del Río Chimborazo de forma aleatoria con periodos ligeros y moderados de forma normal, se observa correlaciones y divergencias con la oscilación del Niño, por otro lado, el NMDWI muestra condiciones diferenciadas de déficit de agua en la zona alta y baja de la CRC, esta última (Zona Baja) es donde se localiza el área agrícola. Hay que tener en cuenta que el SPI monitorea el déficit de precipitación por un periodo razonable de tiempo, identificando de esta forma intensidades de precipitaciones en un periodo razonable de tiempo, pero no tiene en cuenta el impacto que podría ocasionar sobre la vegetación, por lo tanto, el VHI nos ayuda a comprender estas condiciones adicionales de distribución. El año 1991 es el único año donde se observó sequías extremas en un área reducida, la cual ya no se observó en posteriores años, a pesar que el año 2006-2007 las precipitaciones fueron reducidas, por otro lado, en el año 2016 la condición de sequía ligera se distribuyó de diferente forma

causando mayor impacto en la zona Norte-Oeste de la CRC, La Evapotranspiración Potencial sin embargo presenta un aumento en el tiempo y guarda relación con la sequía vegetativa analizada en la presente investigación. A escala local no existen estudios relacionados a sequías vegetativas, por lo que, la presente investigación pretende dar un impulso a nuevas investigaciones en el ámbito local para el monitoreo de este evento adverso, y puede ser fundamental para estudios enfocados a determinar flujos de energía presentes en cada uno de los ecosistemas. Los eventos adversos tienen un enfoque de análisis espacio-temporal, es decir, tiene un importancia en la identificación de la intensidad y la distribución de estas características, pues en la CRC, el estratovolcán Chimborazo cumple una función reguladora de agua en la zona alta, la cual desde el año 1991 al 2016 no presenta una variación relevante en sus características, debido a que no existe un cambio abrupto de la condición de déficit hídrico como se observa en el NMDWI, por otro lado, la vegetación si presenta sensibilidad a los cambios de las precipitaciones en la zona baja de la CRC donde existe actividad agropecuaria, se observa una distribución del patrón de sequía vegetativa hacia la zona norte-oeste de la CRC.

Referencias Bibliográficas

1. Bates, B. Kundzewics, S., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC. Ginebra, Suiza. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>
2. Bhuiyan, C., Singh, R. P., & Kogan, F. N. (2006). Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4), 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.002>
3. Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas : A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
4. CIIFEN. (2017). El Niño 2015-16: evolución, vulnerabilidad e impactos en Latinoamérica, (December), 1–40.
5. Djaman, K., Balde, A. B., Rudnick, D. R., Ndiaye, O., & Irmak, S. (2017). Long-term trend analysis in climate variables and agricultural adaptation strategies to climate change in the

- Senegal River Basin. Royal Meteorological Society, 2888(October 2016), 2873–2888.
<https://doi.org/10.1002/joc.4885>
6. Edwards, D. ., & McKee, T. . (1997). Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report*. Fort Collins. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a325595.pdf>
 7. FAO. (2015). Protocolo para el Proceso de Calibración y Adaptación Nacional de la Herramienta ASIS-PAÍS, 12.
 8. FAO. (2019). PROACTIVE APPROACHES TO DROUGHT PREPAREDNESS-Where are we now and where do we go from here?, 50.
 9. FAO. (2020a). FAO, SMIA, Observación de la Tierra, Ecuador, Indicadores del país, METOP, NDVI, ASIS, VHI, VCI, ECWFMF, Índice de Estrés Agrícola, Anomalía del NDVI, Vegetation Condition Index, Vegetation Health Index, Precipitación Estimada, Anomalía de Precipitación, mapa.
 10. FAO. (2020b, April). FAO, SMIA, Observación de la Tierra, METOP, NDVI, ASIS, VHI, VCI, ECWFMF, Índice de Estrés Agrícola, Anomalía del NDVI, Vegetation Condition Index, Vegetation Health Index, Precipitación Estimada, Anomalía de Precipitación mapa.
 11. Gasparri, E., Tassara, C., & Velasco, M. (1999). No Title. (Abya-Yala, Ed.) (1 Ed). Quito-Ecuador. Retrieved from https://www.academia.edu/1294273/El_fenomeno_de_El_Niño_en_el_Ecuador._1997-1999_Del_desastre_a_la_prevencción
 12. Giesen, N. Van De, Liebe, J., & Jung, G. (2010). Adapting to climate change in the Volta Basin , West Africa. *Special Section: Climate Change and Water Resources*, (April 2015). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/242549121_Adapting_to_climate_change_in_the_Volta_Basin_West_Africa/link/5537497e0cf2058efdeab2d4/download
 13. GWP, & WMO. (2016). Manual de indicadores e índices de sequía (M. Svoboda y B.A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías.
 14. IPCC. (2000). Escenarios de emisiones. Informe Especial Grupo de Trabajo III Del IPCC, 27. Retrieved from <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>

15. IPCC. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf
16. Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11(8), 1405–1419. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
17. Mannocchi, F., Todisco, F., & Vergni, L. (2004). Agricultural drought: Indices, definition and analysis. In IAHS-AISH Publication.
18. Ministerio del Ambiente. (2012). Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador ENCC 2012 -2025, 1, 24–25.
19. Mishra, S. S., & Nagarajan, R. (2013). Hydrological drought assessment in Tel river basin using standardized water level index (SWI) and GIS based interpolation techniques. *International Journal of Conceptions on Mechanical and Civil Engineering*.
20. Naresh, M., Murthy, C. ., Sessa, M., & Roy, P. (2006). Analysis of Standardized Precipitation Index (SPI) data for drought assessment. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.04808.pdf>
21. Overpeck, J., & Trenberth, K. (2003). A multi-millennia perspective on drought and implications for the future. *CLIVAR/PAGES/IPCC Workshop A Multi-Millennia Perspective on Drought and Implications for the Future*, (3), 1–34.
22. Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. Quito-Ecuador. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/39874448.pdf>
23. Rojas, O., Li, Y., & Cumani, R. (2015). Entendiendo el impacto de sequía provocada por El Niño en el área agrícola mundial: una evaluación utilizando el Índice de Estrés Agrícola de la FAO (ASI). Roma: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4251s.pdf>
24. Rojas, O., Li, Y., & Cumani, R. (2015). Entendiendo el impacto de sequía provocada por El Niño en el área agrícola mundial: una evaluación utilizando el Índice de Estrés Agrícola de la FAO (ASI) (Vol. 1, 52 p.).
25. Serrano, S., Beguería, S., Lorenzo, J., Camarero, J., López, J., Azorín, M., ... Sánchez, A. (2010). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. Retrieved from

https://digital.csic.es/bitstream/10261/62168/1/BegueriaS_Analisis_ComnCongSal-AEC_2012.pdf

26. Thomas B. McKee, N. J. D. and J. K. (1993). Analysis of Standardized Precipitation Index (SPI) data for drought assessment. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/5>
27. Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC : a software for drought analysis based on drought indices. *SOFTWARE ARTICLE*, 697–709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
28. Uribe, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Santiago. Retrieved from https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/1/S1501295_es.pdf
29. Vásquez, R., Ventura, E., & Acosta, J. (2011). Habilidad de estimación de los métodos de evapotranspiración para una zona semiárida del centro de México* suitability of evapotranspiration estimation methods for semiarid central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 399–415. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2n3/v2n3a8.pdf>
30. Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, (March), 10. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Reference

1. Bates, B. Kundzewics, S., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). Climate Change and Water. Technical document of the Intergovernmental Group of Experts on Climate Change, IPCC Secretariat. Geneva, Switzerland. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>
2. Bhuiyan, C., Singh, R. P., & Kogan, F. N. (2006). Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (4), 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.002>

3. Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
4. CIIFEN. (2017). El Niño 2015-16: evolution, vulnerability and impacts in Latin America, (December), 1–40.
5. Djaman, K., Balde, A. B., Rudnick, D. R., Ndiaye, O., & Irmak, S. (2017). Long-term trend analysis in climate variables and agricultural adaptation strategies to climate change in the Senegal River Basin. *Royal Meteorological Society*, 2888 (October 2016), 2873–2888. <https://doi.org/10.1002/joc.4885>
6. Edwards, D., & McKee, T. (1997). Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report*. Fort Collins. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a325595.pdf>
7. FAO. (2015). Protocol for the National Calibration and Adaptation Process of the ASIS-COUNTRY Tool, 12.
8. FAO. (2019). PROACTIVE PROACTIVE APPROACHES APPROACHES TO DROUGHT DROUGHT PREPAREDNESS-Where are we now and where do we go from here ?, 50.
9. FAO. (2020a). FAO, GIEWS, Earth Observation, Ecuador, Country indicators, METOP, NDVI, ASIS, VHI, VCI, ECWMF, Agricultural Stress Index, NDVI Anomaly, Vegetation Condition Index, Vegetation Health Index, Estimated Precipitation, Precipitation Anomaly , Map.
10. FAO. (2020b, April). FAO, GIEWS, Earth Observation, METOP, NDVI, ASIS, VHI, VCI, ECWMF, Agricultural Stress Index, NDVI Anomaly, Vegetation Condition Index, Estimated Precipitation, Precipitation Anomaly map.
11. Gasparri, E., Tassara, C., & Velasco, M. (1999). No Title. (Abya-Yala, Ed.) (1 Ed). Quito, Ecuador. Retrieved from https://www.academia.edu/1294273/El_fenomeno_de_El_Niño_en_el_Ecuador._1997-1999_Del_desastre_a_la_prevenición
12. Giesen, N. Van De, Liebe, J., & Jung, G. (2010). Adapting to climate change in the Volta Basin, West Africa. *Special Section: Climate Change and Water Resources*, (April 2015). Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/242549121_Adapting_to_climate_change_in_the_Volta_Basin_West_Africa/link/5537497e0cf2058efdeab2d4/download

13. GWP, & WMO. (2016). Drought indicators and indices manual (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Program, Series 2 of tools and guidelines for Integrated Drought Management.
14. IPCC. (2000). Emission scenarios. IPCC Working Group III Special Report, 27. Retrieved from <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>
15. IPCC. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf
16. Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11 (8), 1405–1419. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
17. Mannocchi, F., Todisco, F., & Vergni, L. (2004). Agricultural drought: Indices, definition and analysis. In IAHS-AISH Publication.
18. Ministry of the Environment. (2012). National Strategy for Climate Change of Ecuador ENCC 2012 -2025, 1, 24–25.
19. Mishra, S. S., & Nagarajan, R. (2013). Hydrological drought assessment in Tel river basin using standardized water level index (SWI) and GIS based interpolation techniques. *International Journal of Conceptions on Mechanical and Civil Engineering*.
20. Naresh, M., Murthy, C., Sessa, M., & Roy, P. (2006). Analysis of Standardized Precipitation Index (SPI) data for drought assessment. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.04808.pdf>
21. Overpeck, J., & Trenberth, K. (2003). A multi-millennia perspective on drought and implications for the future. *CLIVAR / PAGES / IPCC Workshop A Multi-Millennia Perspective on Drought and Implications for the Future*, (3), 1–34.
22. Pourrut, P. (1983). *The climates of Ecuador: explanatory foundations*. Quito, Ecuador. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/39874448.pdf>

23. Rojas, O., Li, Y., & Cumami, R. (2015). Understanding the impact of drought caused by El Niño in the world agricultural area: an evaluation using the FAO Agricultural Stress Index (ASI). Rome: FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4251s.pdf>
24. Rojas, O., Li, Y., & Cumani, R. (2015). Understanding the impact of drought caused by El Niño in the world agricultural area: an evaluation using the FAO Agricultural Stress Index (ASI) (Vol. 1, 52 p.).
25. Serrano, S., Beguería, S., Lorenzo, J., Camarero, J., López, J., Azorín, M.,... Sánchez, A. (2010). Comparative analysis of different drought indices for ecological, agricultural and hydrological applications. Retrieved from https://digital.csic.es/bitstream/10261/62168/1/BegueriaS_Analisis_ComnCongSal-AEC_2012.pdf
26. Thomas B. McKee, N. J. D. and J. K. (1993). Analysis of Standardized Precipitation Index (SPI) data for drought assessment. Water (Switzerland). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/5>
27. Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. ARTICLE SOFTWARE, 697–709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
28. Uribe, E. (2015). Climate change and its effects on biodiversity in Latin America. Santiago. Retrieved from https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/1/S1501295_es.pdf
29. Vásquez, R., Ventura, E., & Acosta, J. (2011). Suitability of evapotranspiration estimation methods for semiarid central Mexico. Evapotranspiration methods estimation ability for a semi-arid zone of central Mexico. Mexican Journal of Agricultural Sciences, 2, 399–415. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2n3/v2n3a8.pdf>
30. Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. International Journal of Remote Sensing, (March), 10. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Referências

1. Bates, B. Kundzewics, S., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). Mudança climática e água. Documento técnico do Grupo Intergovernamental de Peritos em Mudanças Climáticas,

- Secretaria do IPCC. Genebra Suíça. Recuperado em <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>
2. Bhuiyan, C., Singh, R. P. e Kogan, F. N. (2006). Monitoramento da dinâmica da seca na região de Aravalli (Índia) usando diferentes índices baseados em dados de sensoriamento remoto e solo. *Jornal Internacional de Observação da Terra Aplicada e Geoinformação*, 8 (4), 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.002>
 3. Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B. e Wyseure, G. (2006). Variabilidade da precipitação espacial e temporal em áreas montanhosas: um estudo de caso dos Andes do sul do Equador. *Jornal de Hidrologia*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
 4. CIIFEN. (2017). El Niño 2015-16: evolução, vulnerabilidade e impactos na América Latina, (dezembro), 1–40.
 5. Djaman, K., Balde, A. B., Rudnick, D. R., Ndiaye, O., & Irmak, S. (2017). Análise de tendências de longo prazo em variáveis climáticas e estratégias de adaptação agrícola às mudanças climáticas na Bacia do Rio Senegal. *Royal Meteorological Society*, 2888 (outubro de 2016), 2873–2888. <https://doi.org/10.1002/joc.4885>
 6. Edwards, D .., e McKee, T .. (1997). Características da seca do século XX nos Estados Unidos em várias escalas de tempo. *Relatório de Climatologia*. Fort Collins. Disponível em <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a325595.pdf>
 7. FAO. (2015). Protocolo para o processo nacional de calibração e adaptação da ferramenta ASIS-COUNTRY, 12.
 8. FAO. (2019). PROATIVA PROATIVA ABORDAGEM ABORDAGEM À PREPARAÇÃO SECA - Onde estamos agora e para onde vamos daqui?, 50.
 9. FAO. (2020a). FAO, GIEWS, Observação da Terra, Equador, Indicadores de países, METOP, NDVI, ASIS, VHI, VCI, ECWMF, Índice de estresse agrícola, Anomalia do NDVI, Índice de condição da vegetação, Índice de saúde da vegetação, Precipitação estimada, Anomalia de precipitação , Mapa.
 10. FAO. (2020b, abril). FAO, GIEWS, Observação da Terra, METOP, NDVI, ASIS, VHI, VCI, ECWMF, Índice de Estresse Agrícola, Anomalia NDVI, Índice de Condição Vegetal, Precipitação Estimada, Mapa de Anomalia de Precipitação.
 11. Gasparri, E., Tassara, C., & Velasco, M. (1999). Sem título. (Abya-Yala, Ed.) (1 Ed). Quito, Equador. Recuperado em

https://www.academia.edu/1294273/El_fenomeno_de_El_Niño_en_el_Ecuador._1997-1999_Del_desastre_a_la_prevenición

12. Giesen, N. Van De, Liebe, J. e Jung, G. (2010). Adaptação às mudanças climáticas na bacia de Volta, na África Ocidental. Seção Especial: Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos, (abril de 2015). Recuperado em https://www.researchgate.net/publication/242549121_Adapting_to_climate_change_in_the_Volta_Basin_West_Africa/link/5537497e0cf2058efdeab2d4/download
13. GWP e WMO. (2016). Manual de indicadores e índices de seca (M. Svoboda e B.A. Fuchs). Programa Integrado de Gerenciamento de Secas, Série 2 de ferramentas e diretrizes para o Gerenciamento Integrado de Secas.
14. IPCC. (2000) Cenários de emissão. Relatório Especial do Grupo de Trabalho III do IPCC, 27. Retirado de <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>
15. IPCC. (2013). A base da ciência física. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Reino Unido e Nova York, NY, EUA. Recuperado em https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf
16. Kogan, F. N. (1990). Sensoriamento remoto dos impactos climáticos na vegetação em áreas não homogêneas. *Jornal Internacional de Sensoriamento Remoto*, 11 (8), 1405-1419. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
17. Mannocchi, F., Todisco, F. e Vergni, L. (2004). Seca agrícola: índices, definição e análise. Na publicação IAHS-AISH.
18. Ministério do Meio Ambiente. (2012). Estratégia Nacional de Mudanças Climáticas do Equador ENCC 2012 -2025, 1, 24–25.
19. Mishra, S. S. e Nagarajan, R. (2013). Avaliação da seca hidrológica na bacia do rio Tel usando índice de nível de água padronizado (SWI) e técnicas de interpolação baseadas em SIG. *Revista Internacional de Concepções de Mecânica e Engenharia Civil*.
20. Naresh, M., Murthy, C ..., Sessa, M. e Roy, P. (2006). Análise dos dados do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) para avaliação de secas. Disponível em <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1509/1509.04808.pdf>

21. Overpeck, J., & Trenberth, K. (2003). Uma perspectiva milenar sobre seca e implicações para o futuro. Workshop CLIVAR / PAGES / IPCC Uma perspectiva milenar sobre secas e implicações para o futuro, (3), 1–34.
22. Pourrut, P. (1983). Os climas do Equador: fundamentos explicativos. Quito, Equador. Disponível em <https://core.ac.uk/download/pdf/39874448.pdf>
23. Rojas, O., Li, Y., & Cumami, R. (2015). Compreendendo o impacto da seca causada por El Niño na área agrícola global: uma avaliação usando o Índice de Estresse Agrícola da FAO (ASI). Roma: FAO. Disponível em <http://www.fao.org/3/a-i4251s.pdf>
24. Rojas, O., Li, Y., & Cumani, R. (2015). Entendendo o impacto da seca causada por El Niño na área agrícola mundial: uma avaliação usando o Índice de Estresse Agrícola da FAO (ASI) (Vol. 1, 52 p.).
25. Serrano, S., Beguería, S., Lorenzo, J., Camarero, J., López, J., Azorín, M., ... Sánchez, A. (2010). Análise comparativa de diferentes índices de seca para aplicações ecológicas, agrícolas e hidrológicas. Recuperado em https://digital.csic.es/bitstream/10261/62168/1/BegueriaS_Analisis_ComnCongSal-AEC_2012.pdf
26. Thomas B. McKee, N. J. D. e J. K. (1993). Análise dos dados do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) para avaliação de secas. Água (Suíça). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/5>
27. Tigkas, D., Vangelis, H. e Tsakiris, G. (2015). DrinC: um software para análise de secas com base em índices de seca. ARTIGO SOFTWARE, 697–709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
28. Uribe, E. (2015). Mudança climática e seus efeitos sobre a biodiversidade na América Latina. Santiago. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/1/S1501295_es.pdf
29. Vásquez, R., Ventura, E., & Acosta, J. (2011). Adequação dos métodos de estimativa de evapotranspiração para o semiárido central do México Métodos de evapotranspiração para estimar a capacidade de uma zona semi-árida do centro do México. *Jornal Mexicano de Ciências Agrícolas*, 2, 399-415. Disponível em <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2n3/v2n3a8.pdf>

30. Xu, H. (2006). Modificação do índice de água com diferença normalizada (NDWI) para aprimorar os recursos de águas abertas em imagens detectadas remotamente. *International Journal of Remote Sensing*, (março), 10. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).