

# Análisis de rachas de lluvia para el manejo de cultivos de caña, *Saccharum officinarum*, en el valle del río Cauca, Colombia

## Analysis of raining streaks to manage cane crops, *Saccharum officinarum*, in the Cauca River Valley, Colombia

Héctor Alberto Chica Ramírez <sup>1</sup>, Juan José Bravo Bastidas <sup>2</sup>, Andrés Javier Peña Quiñones <sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). San Antonio de los Caballeros, Colombia. ✉ [hachica@cenicana.org](mailto:hachica@cenicana.org)

<sup>2</sup>Universidad del Valle. Cali, Colombia. ✉ [juan.bravo@correounivalle.edu.co](mailto:juan.bravo@correounivalle.edu.co)

<sup>3</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Centro de Investigación La Libertad. Villavicencio, Colombia. ✉ [apena@agrosavia.co](mailto:apena@agrosavia.co)



<https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.91757>

2021 | 70-2 p 119-132 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 22-11-2020. Acep.: 10-08-2021

### Resumen

Las condiciones ecuatoriales del valle del río Cauca determinan que sea posible sembrar y cosechar caña de azúcar durante todo el año. Es decir, no hay fechas definidas de siembra y cosecha, a diferencia de lo que sucede en otros países (zafra). En este escenario, las lluvias, además de impactar la producción vía efectos fisiológicos y epidemiológicos, determinan la probabilidad de ejecución de labores mecanizadas. Labores mecanizadas aplazadas (o no ejecutadas), por efecto de alta humedad en el suelo, afectan la producción. Tal afección de la productividad se debe al asincronismo entre el momento idóneo para realizar una labor y el momento en que esta se ejecuta. Se plantea el análisis descriptivo de dos indicadores climáticos mensuales derivados de los datos diarios de precipitación y el análisis probabilístico de uno de ellos, para priorizar actividades de manejo agrícola *in situ*. El análisis probabilístico se basó en la parametrización de un modelo binomial negativo truncado en cero para cada mes y para cada zona climática de la región bajo análisis. Los resultados muestran que la longitud media de la racha y el número medio de rachas de cada mes y de cada zona varían de forma importante. En ese sentido, los valores medios de estas variables en las dos zonas más lluviosas de la región difieren notablemente, determinando manejos diferenciales para la caña de azúcar, cultivo de importancia máxima para la economía regional.

**Palabras claves:** rachas de lluvia, climatología, toma de decisiones, producción.

### Abstract

The equatorial conditions of the Cauca River Valley determine that sugarcane can be sown and harvested throughout the year. That is, there are no defined dates for sowing and harvesting, unlike what happens in other countries (zafra). In this scenario, the rainfall in addition to impacting production via physiological and epidemiological effects, determine the probability of mechanized tasks. A postponed mechanized labor (or not executed), because of high humidity in the soil, affects the production. Such an effect on productivity is due to the asynchronism between the ideal moment to carry out a task and the moment when it is executed. The descriptive analysis of two monthly climatic indicators derived from the daily precipitation data and the probabilistic analysis of one of them are proposed to prioritize agricultural management activities *in situ*. The probabilistic analysis was based on the parameterization of a negative binomial model truncated at zero for each month and for each climatic zone of the region under analysis. The results show that the average length of the streak and the average number of streaks for each month and each zone vary significantly. In this sense, the average values of these variables in the two rainiest areas of the region differ markedly, determining differential management for sugar cane, a crop of the maximum importance for the regional economy.

**Keywords:** rainy streaks, climatology, decision making, production.

## Introducción

El valle del río Cauca, en Colombia, en medio de las cordilleras central y occidental, es una planicie o llanura que tiene una altitud media de 1000 metros sobre el nivel del mar, que se ubica entre los 3 y 5°N de latitud. Las cordilleras, la posición ecuatorial y la cercanía al océano Pacífico determinan el clima de la región (Cortés *et al.*, 2019). A su vez, la zona de confluencia intertropical se configura como el principal modulador de variabilidad climática intra-anual del territorio (Zea *et al.*, 2000). En esta planicie el 65 % del total de tierras disponibles para la agricultura (250.000 ha, aproximadamente) están sembradas con caña de azúcar. La industria de la caña sustenta en gran medida la economía regional y representa el 3.7 % del PIB agrícola de Colombia (Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia [Asocaña], 2017). La producción de caña y de sus derivados genera 37.500 empleos directos y más de 240.000 empleos indirectos. Por lo tanto, el cultivo de esta especie no solo sustenta la economía regional sino la economía nacional (Preciado *et al.*, 2020). El sistema de producción de caña de azúcar en la región es intensivo, se siembra y se cosecha durante todo el año (no zafras) y la mayor parte de las labores son mecanizadas (Arias *et al.*, 2016; Porras, 1995).

Por su localización ecuatorial, en el valle del río Cauca se puede sembrar y cosechar caña de azúcar durante todo el año (no Zafras) (Henry, 2005). En tales condiciones, donde la temperatura del aire y la radiación no sufren cambios drásticos a través del tiempo, como está reportado desde hace casi 150 años (Wallace, 1878), la precipitación se convierte en el elemento climático de mayor variabilidad intra e interanual. Sin embargo, el impacto de la lluvia sobre los sistemas de producción agrícola mecanizada es doble. Afecta de forma directa, a través del efecto fisiológico sobre las plantas cultivadas y sobre la dinámica poblacional de especies antagonistas. De forma indirecta, la precipitación impacta a través del efecto que ejerce la lluvia sobre la oportunidad de realización de labores en campo. La oportunidad de labor se refiere a la posibilidad de ejecutar itinerarios técnicos, como la cosecha, la fertilización, el laboreo del suelo y el control de malezas, en el momento indicado. No obstante, la probabilidad de efectuar una labor en el momento requerido depende del estado de humedad del suelo.

En este estudio se genera información para el mejoramiento de la planificación del cultivo de la caña de azúcar a escala de lote de cultivo, a partir del conocimiento del efecto de la lluvia sobre la oportunidad de realizar labores de campo. Se parte de la premisa de que, si bien, el volumen medio de lluvia por unidad de área y el número medio de días

con lluvia por mes permiten identificar estaciones de siembra y cosecha, el tomador de decisiones a escala de lote (suerte) debe responder interrogantes más complejas. El encargado de un cultivo de caña debe responder preguntas como ¿cuánto durará la actual condición de lluvias? o ¿habrá otra condición como la actual en lo que queda del mes? Estas preguntas pueden responderse a la luz de los análisis de las rachas de lluvia. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo identificar el comportamiento mensual de dos índices meteorológicos de interés agrícola, llamados número de rachas por mes y longitud media de la racha, que puedan ser usados como variables claves en la definición de manejo agrícola, enfocado al cultivo de la caña de azúcar, en el valle del río cauca, Colombia.

## Métodos

### Escala de análisis espacial.

De acuerdo con Cortés *et al.* (2019), en la región productora de caña de azúcar del valle del río cauca se identifican siete zonas climáticas (Figura 1). En la definición de las zonas se tuvo en cuenta la precipitación acumulada y otras variables meteorológicas diferentes a la lluvia, por lo que la zonificación define sitios con características climáticas diferentes que podrían afectar la producción potencial de cultivos en la región. Dado que dicha zonificación es la herramienta para tomar varias decisiones que involucran clima y manejo del cultivo, este estudio se centra en ese antecedente. Es decir, el análisis es a escala de zona climática.

### Datos.

Se utilizaron los datos diarios de lluvia medidos en las estaciones meteorológicas instaladas en las zonas climáticas (Figura 1). En total son 34 estaciones, en las que se mide la precipitación a un metro de altura, de acuerdo con las especificaciones de la organización meteorológica mundial (World Meteorological Organization [WMO], 2008). El dispositivo utilizado para ello fue un pluviómetro de superficie de captación circular de 0.2 m de diámetro, con embudo estándar, a cuya salida se encuentra el sensor, el cual mide el número de movimientos de los baldes basculantes, específicamente un pluviómetro Texas TR-525 (Texas Electronics, Dallas, Texas). Un dispositivo de almacenamiento o datalogger modelo CR-1000 (Campbell Sci., Logan, Utah) se utiliza para guardar la información horaria y generar el dato diario con base en ella. A pesar de que las estaciones no tienen la misma longitud temporal, la mayoría de ellas fueron instaladas entre 1993 y 1997 y se utilizaron los datos registrados por ellas hasta el último día del año 2019.

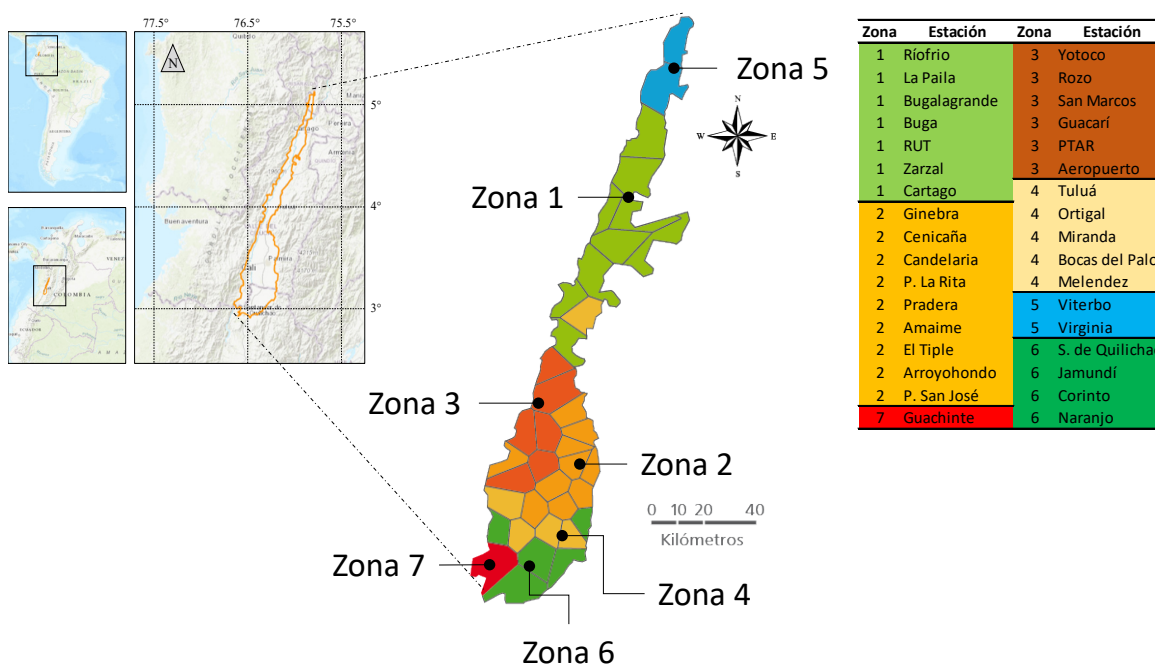


Figura 1. Zonas climáticas del valle del río cauca.

## Análisis

### Generación de las rachas de lluvia.

Una racha se define como una secuencia de valores muestrales con una característica común precedida y seguida por valores que no presentan aquella característica. Aplicado a valores de lluvia, los cuales están indexados en el tiempo (nivel diario en este trabajo), una racha se entiende como días consecutivos con lluvia mayor a 1 mm hasta que deja de llover. Según esta definición, y teniendo en cuenta que un mes puede tener 28, 29, 30 o 31 días, una variable aleatoria  $X$  que cuente la duración de la racha

(número de días consecutivos con lluvia mayor a 1 mm) tendrá como dominio los números naturales entre 1 y 28, 29, 30 o 31 según el mes. Por definición de racha,  $X$  es cero-truncada, ya que, de lo contrario,

contaría como un día sin lluvia. En este trabajo, y por zona climática y por mes, se unieron las duraciones de las rachas de lluvia y se construyó la tabla de frecuencias en las que se muestran sus respectivas media y varianza.

### Ajuste de la duración de la racha a un modelo probabilístico.

Dado el comportamiento frecuentista del número de días con lluvia, el cual es de cola larga, se ajustó a un modelo binomial negativo.

La mínima racha de lluvia es un día, se utilizó el modelo binomial negativo truncado en cero derivado de la siguiente forma:

Sea

$$NB(x, k, \mu) = \frac{\Gamma(k+x)}{x! \Gamma(k)} \left[ \frac{\mu}{\mu+k} \right]^x \left[ \frac{k}{k+\mu} \right]^k, \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

(Ec. 1)

Una parametrización de la distribución binomial negativa (Lloyd-Smith, 2007), evaluando la ecuación en el valor cero (0) se tiene,

$$f(0) = F(0) = \left[ \frac{k}{k+\mu} \right]^k \quad (\text{Ec. 2})$$

Ahora, por la probabilidad condicional de  $X$ , dado

$X > x_0$ ,  $x_0$  fijo se tiene (Hogg et al., 2019):

$$NB(x, k, \mu / x > 0) = \frac{\left[ \frac{\Gamma(k+x)}{x! \Gamma(k)} \right] \left[ \frac{\mu}{\mu+k} \right]^x \left[ \frac{k}{k+\mu} \right]^k}{1 - \left[ \frac{k}{k+\mu} \right]^k}, \quad x = 1, 2, \dots$$

(Ec. 3)

Cuyo valor esperado es (Taylor et al., 1979):

$$E(x, k, \mu / x > 0) = \frac{\mu}{1 - \left[ \frac{k}{k + \mu} \right]^k} \quad (\text{Ec. 4})$$

Y varianza (Taylor et al., 1979):

$$VAR(x, k, \mu / x > 0) = \frac{\mu + \mu^2 + \mu^2/k}{1 - \left[ \frac{k}{k + \mu} \right]^k} - \frac{\mu^2}{\left[ 1 - \left( \frac{k}{k + \mu} \right)^k \right]^2}, \quad k > 0, \quad \mu > 0$$

(Ec. 5)

La estimación de  $\mu$  y  $k$  se hizo maximizando la verosimilitud de la cual es:

$$\log [L(x_1, \dots, x_n / k, \mu)] = \prod_{i=1}^n \frac{\left[ \frac{\Gamma(k + x_i)}{x_i! \Gamma(k)} \right] \left[ \frac{\mu}{\mu + k} \right]^{x_i} \left[ \frac{k}{k + \mu} \right]^k}{1 - \left[ \frac{k}{k + \mu} \right]^k}$$

$$= n \left\{ k \log \left[ \frac{k}{k + \mu} \right] - \log [\Gamma(k)] - \log \left[ 1 - \left( \frac{k}{k + \mu} \right)^k \right] \right\}$$

$$- \sum_{i=1}^n x_i \log \left( \frac{\mu}{\mu + k} \right) + \sum_{i=1}^n \log [\Gamma(x_i + k)] - \sum_{i=1}^n \log (x_i!)$$

(Ec. 6)

La sistematización se hizo en SAS STAT V15.1 procedimiento *nlmixed* a partir de la verosimilitud de la ecuación (6).

## Generación de ventanas de pluviosidad.

Retomando el hecho de que

$$f(x | X > x_0) = f(x) / [1 - F(x_0)], \quad x_0 < x,$$

cuando  $x$  es discreta, se tiene que:

$$F(x) = P(X \leq x | X > x_0) = \frac{\sum_{x_0+1 \leq x_i \leq x} f(x_i)}{1 - F(x_0)}$$

(Ec. 7)

Y,

$$P(X > x | X > x_0) = 1 - \frac{\sum_{x_0+1 \leq x_i \leq x} f(x_i)}{1 - F(x_0)} \quad (\text{Ec. 8})$$

Siendo la ecuación (8) la probabilidad de llover más de  $x$  días dado que ya llovió más de  $x_0$  días. El cálculo de estas probabilidades permite aproximar una de la racha de lluvia asociada a una probabilidad de ocurrencia. En este trabajo se muestran la duración de la racha en días mientras que la probabilidad de la ecuación (8) sea mayor a 1 %, 5 %, 10 %, 25 %, 40 % y 60 %.

## Resultados y discusión

### Descripción de las temporadas secas y lluviosas.

En el valle del río Cauca la lluvia total anual se acumula siguiendo un patrón bimodal (Cortés y Barrios, 2010). No está relacionado este patrón con una doble moda en los histogramas de frecuencias de eventos de lluvia. Se designa bimodal al patrón de alternancia de dos épocas secas y dos épocas lluviosas a través del año. Se ha determinado que ese comportamiento está asociado con el doble paso del ecuador climático, también conocido como zona de confluencia intertropical, sobre la región ecuatorial (Jaramillo, 2005). Sin embargo, vale la pena anotar que este patrón se ha idealizado y se tiende a pensar que cada una de las épocas en cuestión tienen una duración similar, de alrededor de 91 días, y que la intensidad de la precipitación en cada par de épocas es idéntica.

En los trabajos realizados por Cortes y Barrios (2010) se aclaró que, además de las épocas secas y lluviosas, existen en el ciclo anual de lluvias temporadas de transición que, por lo general, no se vislumbran en los análisis a escala mensual. Queda en evidencia la naturaleza local del tipo de patrón de distribución intraanual de las lluvias, identificándose tres tipos de bimodalidad (Figura 2). La bimodalidad del valle del río Risaralda (zona 5) con una época seca fuerte, pero corta, entre diciembre y enero, casi sin segunda época lluviosa, difiere de la bimodalidad que se observa en el sur del valle del río Cauca (zonas 6 y 7). En el sur, la época seca de mitad de año es más fuerte que la de principio de año, mostrando un comportamiento temporal inverso al del valle del Risaralda (Figura 2). En el resto de la región (zonas 1, 2, 3 y 4) el comportamiento de la lluvia es cercano al idealizado (Figura 2a). Las tres regiones tienen también un comportamiento típico del número de días con precipitación. En los meses lluviosos hay

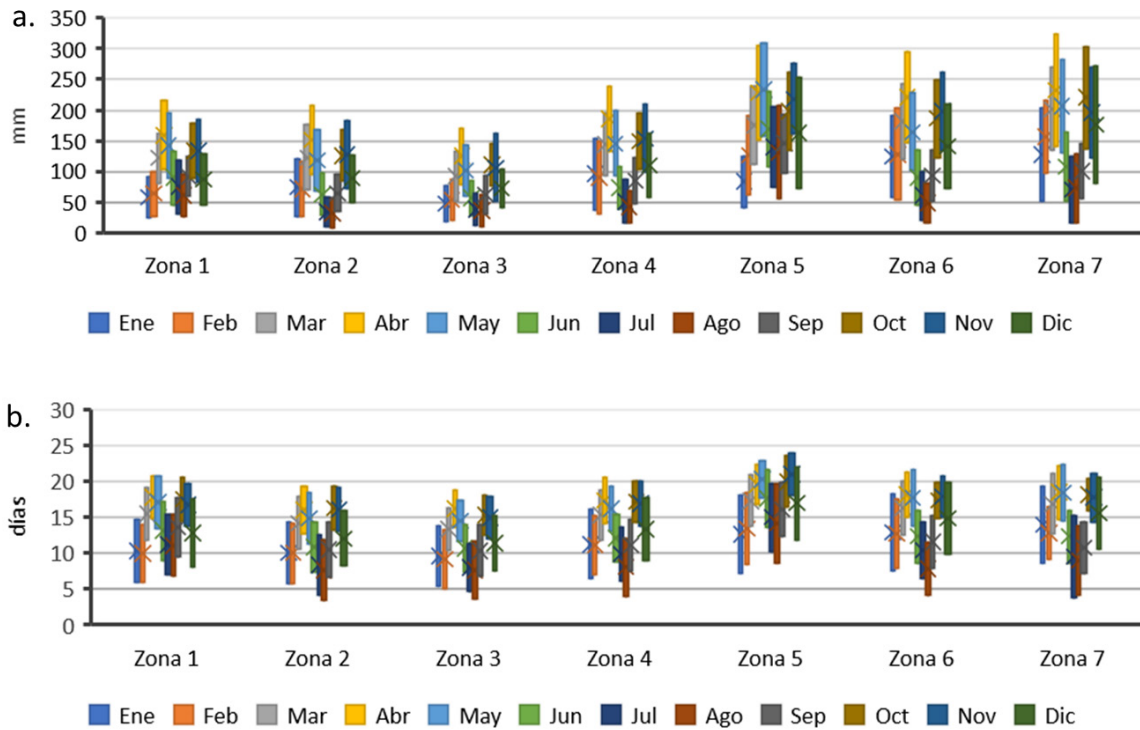


Figura 2. Valores medios y desviación estándar de la precipitación mensual en las zonas (arriba) y número de días lluviosos (abajo).

un mayor número de días con lluvia, mientras que en los meses secos se encuentra un menor número de días lluviosos (Figura 2b).

Esta información es suficiente para planificar cultivos a escala de año y de mes; de hecho, con base en aquella información se determina, desde las épocas en las que se cosechará mayormente bajo el esquema semi mecanizado, las fechas de preparación de suelos para nuevas siembras (plantillas), hasta las épocas para el mantenimiento de las fábricas (ingenios). Específicamente, en el norte y en el sur del valle del río Cauca, ciertas actividades deberían concentrarse más, dado que las épocas secas tienen menor duración en comparación con lo que ocurre en otras zonas (Figura 2). Sin embargo, para la planificación semanal de actividades esta información puede ser insuficiente.

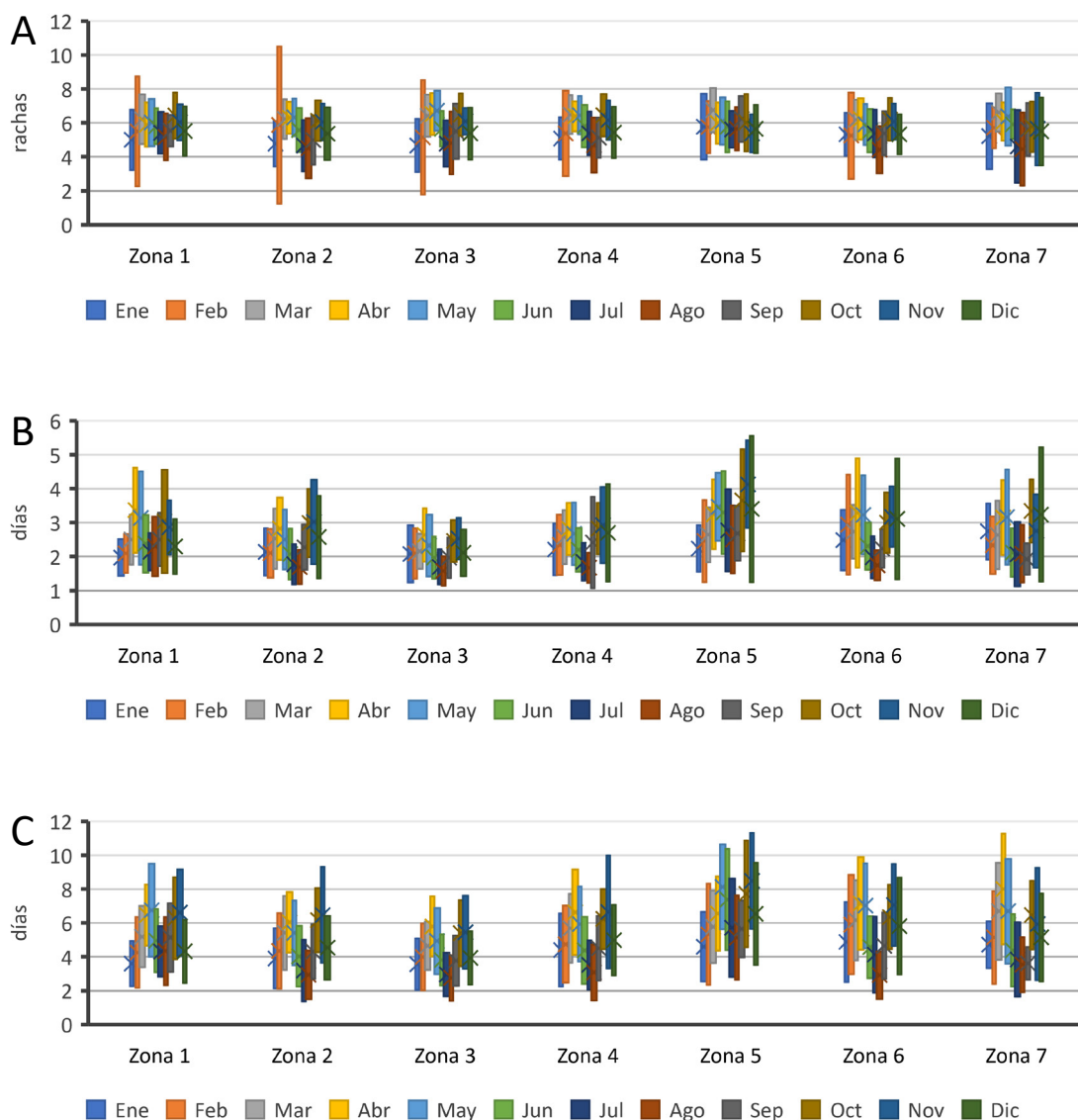
### Análisis descriptivo de las rachas de lluvia.

En las zonas climáticas 1, 5, 6, y 7, por ejemplo, el número medio de rachas por mes varía poco a través del año. En dichas zonas, son comunes 5 a 6 rachas por mes (Figura 3a), variando la duración media de la racha a través de los meses. El mayor número medio de días por racha se observa en las épocas lluviosas y lo contrario en las épocas secas (o menos lluviosas) (Figura 3b). En las otras zonas climáticas (2, 3 y 4), varían tanto el número de rachas, como el número medio de días por racha (Figura 3). En las zonas 2,

3 y 4 es normal encontrar que el número de rachas y la longitud media de la racha es menor en épocas secas (o menos lluviosas) en comparación con las épocas lluviosas, cuando ambas variables tienden a ser mayores.

Las zonas 1, 5, 6 y 7 tienen la misma característica; las estaciones ubicadas en esas áreas están expuestas, o por lo menos más cercanas, a las dos cordilleras. Es decir, se trata de un efecto orográfico que determina que aun en temporadas secas haya alguna probabilidad de lluvias. De otra parte, el promedio del máximo número de días consecutivos con lluvia que puede tener una racha sigue un patrón bimodal clásico, mostrando claramente el efecto de la ZCIT sobre esta variable (Figura 3c). Sin embargo, el análisis de eventos muestra que lo que marca la diferencia entre los meses de mayor y menor acumulación de lluvias es la frecuencia de rachas de un día de duración. En los meses secos (menos lluviosos), este evento (1 día de lluvia) es más frecuente que en los meses lluviosos (Figura 4).

En términos de frecuencia, y en forma generalizada para todas las zonas climáticas, los meses en los que se esperaría tener rachas de mayor longitud serían abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Vale la pena mencionar que la reducción en la frecuencia de rachas de longitud uno (1 día), no representa necesariamente un incremento en la frecuencia de algún otro tipo de evento en particular. Como característica especial, en las tres zonas más lluviosas



**Figura 3.** Promedio y desviación estándar del número de rachas por mes (A), de duración de cada racha (B) y de duración máxima de cada racha (C).

de la región (zonas 5, 6 y 7) la diferencia entre la frecuencia de rachas de un día y de dos días es más baja que en las otras zonas climáticas, concretamente durante los meses lluviosos (Figuras 5e, 5f, 5g).

De acuerdo con el análisis anterior, queda expuesta claramente la condición inversa del ciclo anual de lluvias existente entre la zona lluviosa del norte (zona 5) y las zonas lluviosas del sur (zonas 6 y 7). Es decir, mientras en la zona 5 la máxima frecuencia de rachas de un día es alta únicamente durante enero y febrero, en las zonas 6 y 7 la máxima frecuencia de este tipo de evento se presenta entre julio y agosto, mostrando que las épocas secas importantes varían temporalmente entre norte y sur. Además, se observa que, con excepción de la zona climática 1, la menor frecuencia de rachas de longitud uno (1 día) se presenta de forma generalizada entre octubre y diciembre, mostrando una diferencia

básica en el comportamiento de las dos temporadas lluviosas (Figura 4). Es decir, es posible que las labores mecanizadas se vean más interrumpidas durante la temporada lluviosa del segundo semestre, en comparación con las de la temporada lluviosa del primer semestre del año. En la zona climática 1, la menor frecuencia de este evento se presenta en abril. En la Figura 5 se describe la longitud de la racha asociada a una probabilidad empírica del 80 % (Frecuencia relativa de los histogramas).

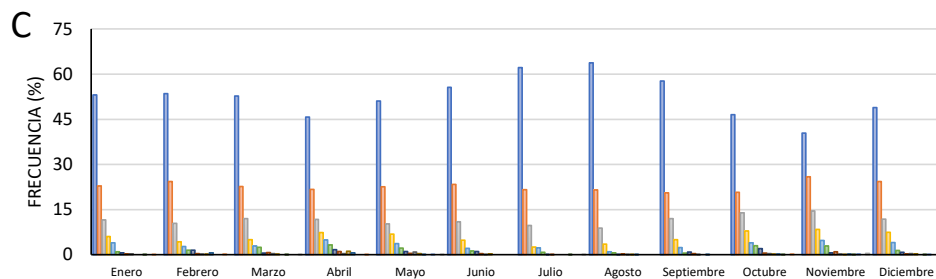
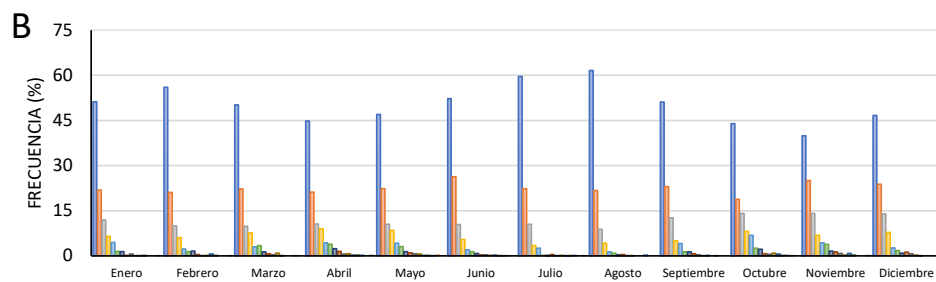
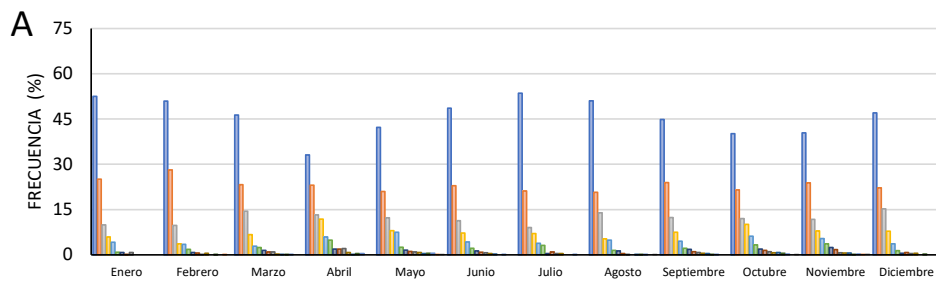
### Ajuste al modelo probabilístico y definición de manejo.

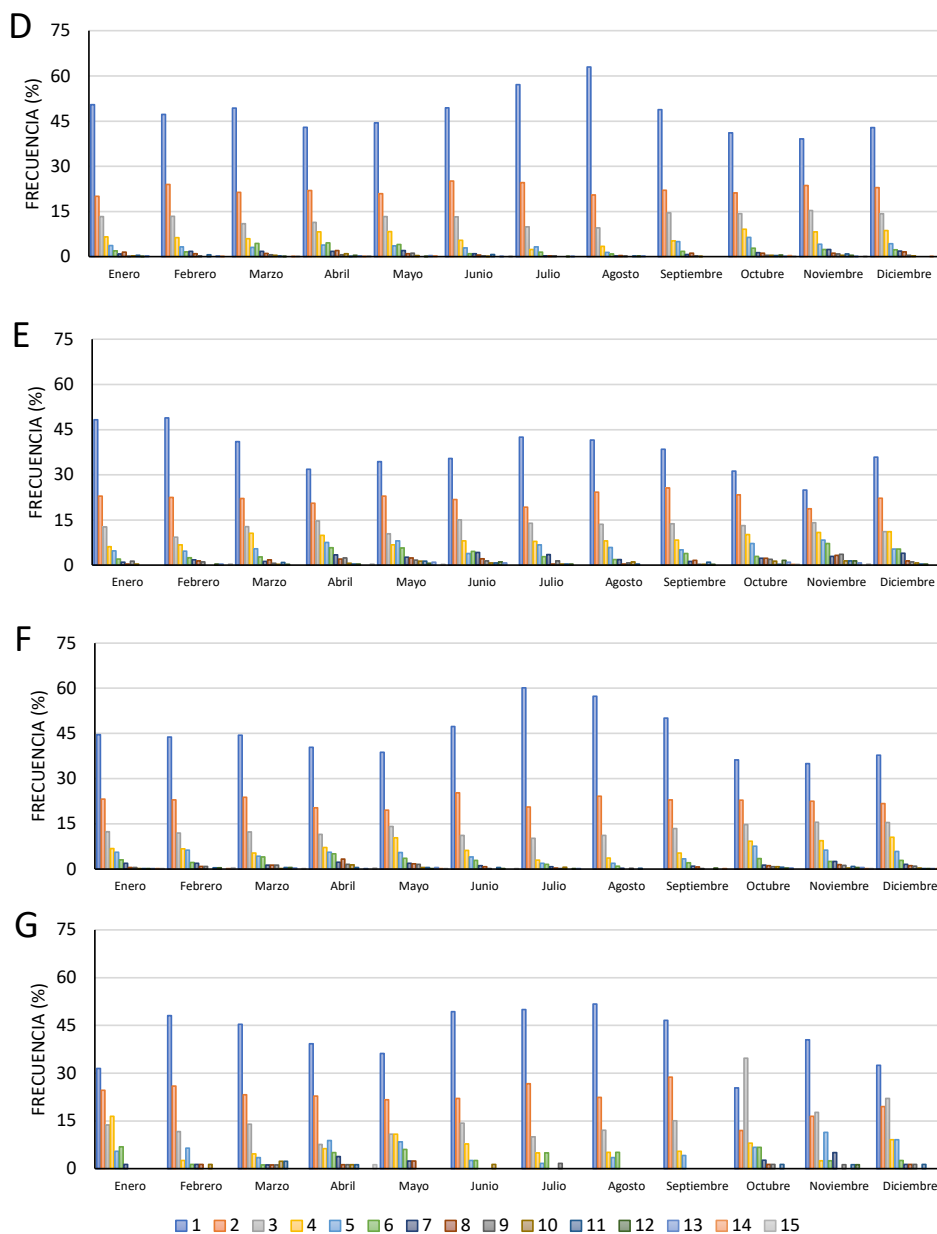
El modelo binomial negativo truncado en cero se ajustó a las rachas de lluvia de las siete zonas climáticas por cada mes, mostrándose las estimaciones de  $\mu$  y  $k$  en la Tabla 1. En la prueba Chi-Cuadrada

Tabla 1. Parámetros del modelo binomial negativo truncado en cero para cada zona y mes

| Parám. | Zona | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K      | 1    | 0.708 | 0.345 | 0.465 | 1.004 | 0.305 | 0.454 | 0.243 | 0.241 | 0.581 | 0.536 | 0.458 | 0.636 |
|        | 2    | 0.440 | 0.005 | 0.166 | 0.297 | 0.403 | 0.538 | 0.167 | 0.084 | 0.439 | 0.414 | 0.432 | 0.503 |
|        | 3    | 0.548 | 0.159 | 0.322 | 0.334 | 0.290 | 0.563 | 0.250 | 0.150 | 0.305 | 0.510 | 0.883 | 0.748 |
|        | 4    | 0.288 | 0.407 | 0.177 | 0.278 | 0.504 | 0.531 | 0.323 | 0.015 | 0.509 | 0.688 | 0.487 | 0.649 |
|        | 5    | 0.590 | 0.163 | 0.755 | 1.147 | 0.556 | 0.657 | 0.419 | 0.727 | 0.997 | 0.742 | 1.235 | 0.592 |
|        | 6    | 0.532 | 0.238 | 0.316 | 0.326 | 0.558 | 0.536 | 0.000 | 0.734 | 0.367 | 0.863 | 0.651 | 0.624 |
|        | 7    | 4.937 | 0.238 | 0.219 | 0.359 | 0.805 | 0.827 | 0.774 | 0.777 | 8.385 | 3.965 | 0.600 | 2.042 |
| U      | 1    | 0.814 | 0.591 | 0.874 | 1.940 | 0.943 | 0.838 | 0.513 | 0.527 | 1.070 | 1.348 | 1.207 | 0.997 |
|        | 2    | 0.742 | 0.014 | 0.420 | 0.833 | 0.870 | 0.722 | 0.268 | 0.132 | 0.721 | 1.066 | 1.133 | 0.905 |
|        | 3    | 0.733 | 0.331 | 0.547 | 0.821 | 0.591 | 0.662 | 0.315 | 0.188 | 0.443 | 0.990 | 1.363 | 0.972 |
|        | 4    | 0.627 | 0.811 | 0.486 | 0.847 | 1.103 | 0.792 | 0.448 | 0.025 | 0.858 | 1.374 | 1.255 | 1.199 |
|        | 5    | 0.942 | 0.458 | 1.360 | 2.146 | 1.738 | 1.718 | 1.158 | 1.297 | 1.553 | 2.060 | 3.030 | 1.659 |
|        | 6    | 1.064 | 0.747 | 0.833 | 1.139 | 1.457 | 0.895 | 0.000 | 0.663 | 0.680 | 1.699 | 1.669 | 1.469 |
|        | 7    | 2.238 | 0.566 | 0.674 | 1.281 | 1.656 | 1.002 | 0.953 | 0.916 | 1.386 | 2.759 | 1.508 | 2.164 |

\*decisión a largo plazo; \*\*decisión a corto plazo; a referirse a la Tabla 2; b referirse a la Tabla 3; c referirse a la Tabla 4 en el caso de abril (zona 6) o Tabla 5 en el caso de agosto (zona 6). Las otras probabilidades (otros meses y zonas) pueden se halladas utilizando la ecuación 8 y los parámetros de la Tabla 1.





**Figura 4.** Frecuencia relativa de rachas de diferente duración (1 a 15 días) en diferentes meses y en diferentes zonas, zona 1 (A) a zona 7 (G).

no se evidenció que las rachas no se ajustaron a la distribución en cuestión ( $P$ -valores  $> 0.05$ ) (Figura 6). En general, se encontró que, dependiendo de la zona climática y del mes, hay mayor probabilidad de tener rachas de lluvia de diferente longitud. Por ejemplo, históricamente durante el mes de enero, el 80 % de las veces se han presentado longitudes de racha inferiores a cuatro días en la zona climática 7, inferiores a tres días en las zonas climáticas 2, 4, 5 y 6, e inferiores a dos días en las zonas climáticas 1 y 3 (Figura 7). Lo anterior significa que, si se tiene programada una actividad de manejo en enero y llueve, hay mayor probabilidad de que el evento lluvioso se prolongue y llueva de nuevo al día siguiente en las zonas climáticas 2, 4, 5, 6 y 7.

Teniendo en cuenta que el drenaje de la mayoría de los suelos en el valle del río Cauca es lento (Carbonell *et al.*, 2001), el número de días en los que las labores mecanizadas pueden restringirse, por efecto de un evento lluvioso de duración  $n$  (en días),

será de entre uno y cinco días en la zona climática 3 en julio, mientras que en la zona climática 5, en noviembre, la restricción puede ser de entre uno y 13 días (Tabla 2). Con base en esta información, queda claro que hay épocas del año en las que, debido a las condiciones climáticas, es poco probable realizar labores agrícolas mecanizadas. De hecho, si es posible hacer las labores, pero produciendo daños en el suelo y en los nuevos brotes de caña de azúcar (Erickson, 2006).



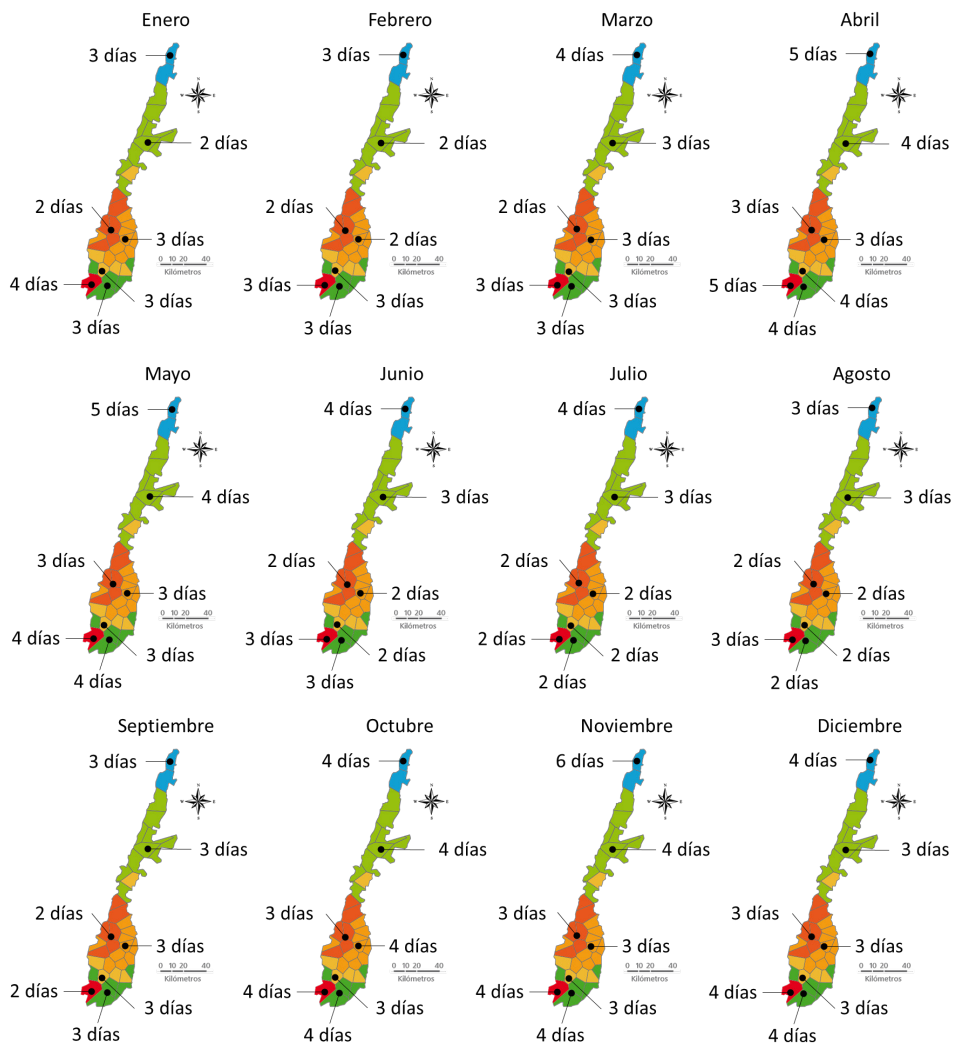


Figura 5. Longitud de la racha (frecuencia acumulada = 80 %) por zona climática.

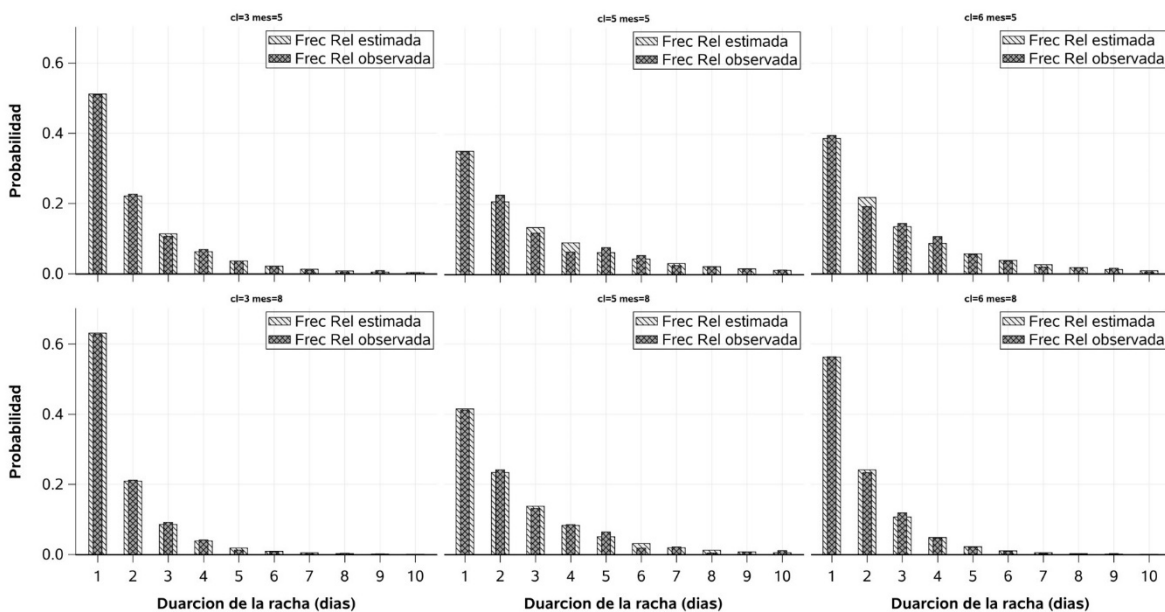


Figura 6. Frecuencia empírica vs. frecuencia teórica de la longitud de la racha (días) para algunas zonas (cl) y meses contrastantes.

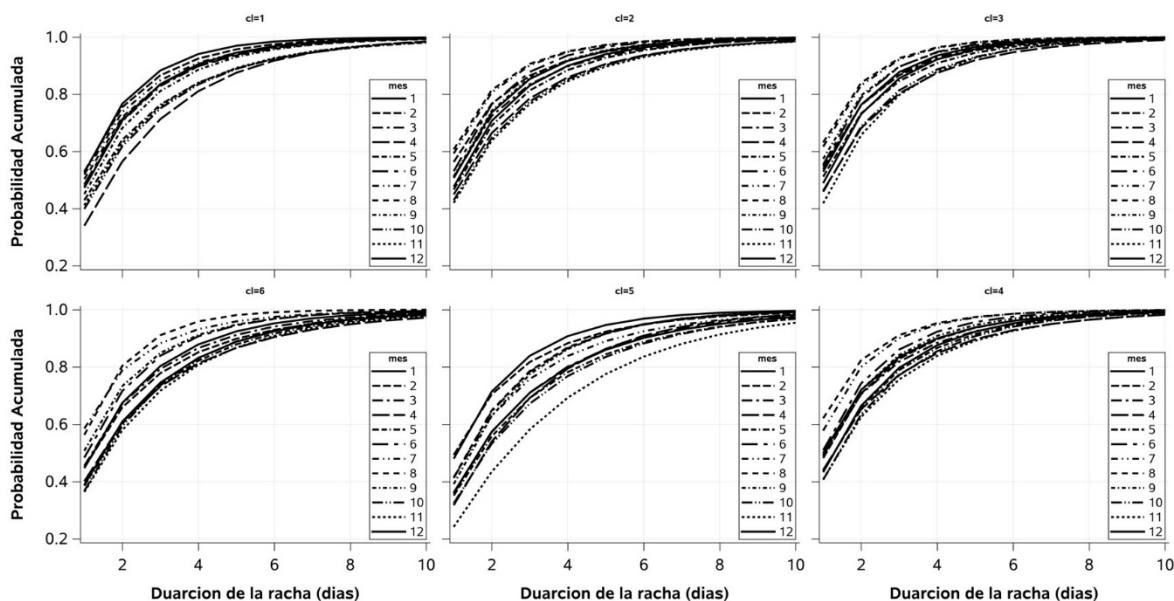


Figura 7. Frecuencia acumulada teórica de la longitud de la racha (días) de acuerdo con el modelo ajustado por zona (cl) y por mes (1-12).

La aplicación del modelo binomial negativo en las labores y la logística mensual del cultivo de la caña de azúcar es inmediata en modelos de asignación, como los que se reportan en Guan *et al.* (2008) para diseñar planes de trabajo en haciendas. Dependiendo del tipo de suelo y la época del año es posible definir la fecha óptima de ejecución de una labor mecanizada. Por ejemplo, durante el mes de marzo, un tomador de decisiones ubicado en la zona climática 6 (sur del valle), que está planificando una labor para el mes de abril, y que está al tanto del contexto pluvial del momento (húmedo o seco) puede definir de mejor manera la oportunidad de realizar dicha labor (Figura 8). Con conocimiento del contexto pluvial se hace referencia a que, como definieron Peña *et al.* (2001) para la región, no todos los años son similares y se

encuentran periodos más y menos húmedos. Es decir, en un periodo húmedo, como ocurre en la mayoría de los eventos La Niña en la región andina (Ramírez y Jaramillo, 2009), la racha puede ser de hasta 13 días en abril (Tabla 2).

Por otra parte, durante el mismo mes de abril, en el contexto de escasez de lluvias (probablemente un evento El Niño), la racha máxima puede ser hasta de dos días (Tabla 3). Considerando la prioridad que tenga una labor, el decisor puede decidir efectuarla y asumir los costos financieros de remediar el daño en el suelo, cuando la hace en condiciones no óptimas. También puede desistir de ejecutar la labor y ajustar el calendario de actividades, al priorizar labores en otras zonas climáticas, para las cuales debería hacer el mismo tipo de consulta (Tablas 2 y 3).

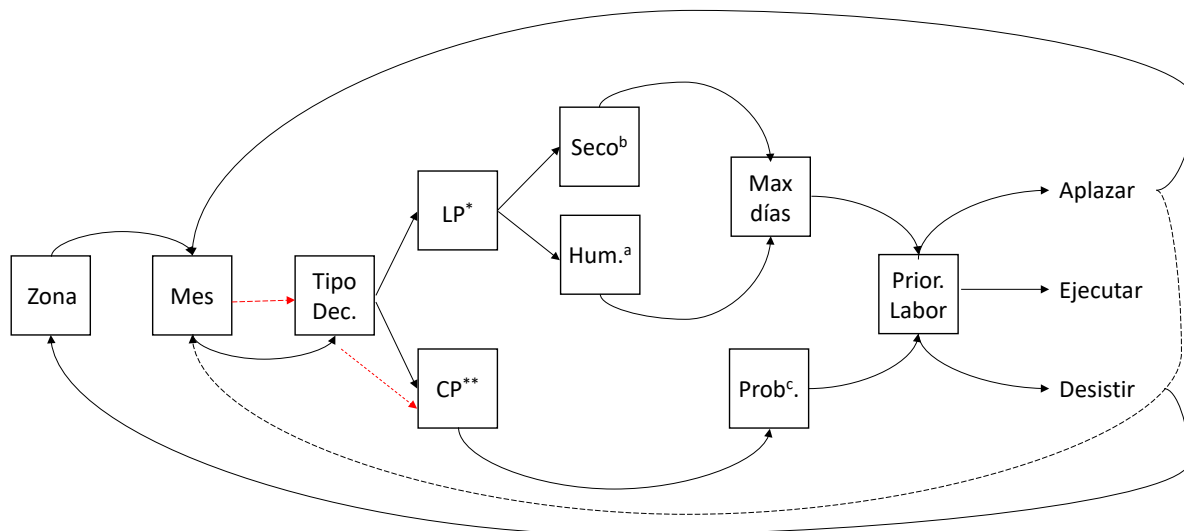


Figura 8. Esquema básico de uso del análisis del número de días consecutivos con lluvia en la toma de decisiones a escala de lote de cultivo.

**Tabla 2.** Duración de la racha de lluvia asociada a diferentes probabilidades acumuladas (%). Época lluviosa

| Probabilidad | Mes | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 | Zona 6 | Zona 7 |
|--------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 99%          | Ene | 6      | 7      | 7      | 9      | 8      | 9      | 7      |
|              | Feb | 7      | 8      | 8      | 8      | 10     | 11     | 9      |
|              | Mar | 8      | 9      | 7      | 10     | 9      | 10     | 11     |
|              | Abr | 11     | 11     | 10     | 11     | 11     | 13     | 13     |
|              | May | 12     | 9      | 8      | 10     | 13     | 11     | 10     |
|              | Jun | 8      | 7      | 6      | 7      | 12     | 8      | 7      |
|              | Jul | 8      | 6      | 5      | 6      | 11     | 7      | 7      |
|              | Ago | 9      | 6      | 5      | 6      | 9      | 5      | 6      |
|              | Sep | 9      | 7      | 6      | 8      | 9      | 8      | 4      |
|              | Oct | 11     | 10     | 9      | 10     | 13     | 10     | 9      |
|              | Nov | 11     | 11     | 8      | 11     | 14     | 12     | 11     |
|              | Dic | 8      | 8      | 7      | 9      | 12     | 11     | 9      |
| 95%          | Ene | 4      | 4      | 4      | 5      | 5      | 5      | 5      |
|              | Feb | 4      | 5      | 4      | 5      | 6      | 6      | 5      |
|              | Mar | 5      | 5      | 4      | 5      | 6      | 6      | 6      |
|              | Abr | 7      | 6      | 6      | 6      | 7      | 8      | 8      |
|              | May | 7      | 5      | 5      | 6      | 8      | 7      | 6      |
|              | Jun | 5      | 4      | 4      | 4      | 7      | 5      | 4      |
|              | Jul | 5      | 4      | 3      | 4      | 7      | 4      | 4      |
|              | Ago | 5      | 3      | 3      | 3      | 6      | 3      | 4      |
|              | Sep | 5      | 4      | 4      | 5      | 6      | 5      | 3      |
|              | Oct | 7      | 6      | 5      | 6      | 8      | 6      | 6      |
|              | Nov | 7      | 6      | 5      | 7      | 9      | 7      | 7      |
|              | Dic | 5      | 5      | 4      | 5      | 7      | 7      | 6      |
| 90%          | Ene | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 4      | 4      |
|              | Feb | 3      | 3      | 3      | 4      | 4      | 5      | 4      |
|              | Mar | 4      | 4      | 3      | 4      | 4      | 4      | 4      |
|              | Abr | 5      | 4      | 4      | 5      | 5      | 5      | 6      |
|              | May | 5      | 4      | 3      | 4      | 6      | 5      | 5      |
|              | Jun | 3      | 3      | 3      | 3      | 5      | 3      | 3      |
|              | Jul | 3      | 2      | 2      | 2      | 5      | 3      | 3      |
|              | Ago | 4      | 2      | 2      | 2      | 4      | 2      | 3      |
|              | Sep | 4      | 3      | 3      | 3      | 4      | 3      | 2      |
|              | Oct | 5      | 4      | 4      | 4      | 6      | 5      | 5      |
|              | Nov | 5      | 5      | 4      | 5      | 7      | 5      | 5      |
|              | Dic | 3      | 4      | 3      | 4      | 5      | 5      | 4      |

**Tabla 3.** Duración de la racha de lluvia asociada a diferentes probabilidades acumuladas (%). Época seca

| Probabilidad | mes | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 | Zona 5 | Zona 6 | Zona 7 |
|--------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 50%          | Ene |        |        |        | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Feb |        |        |        | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Mar | 1      |        |        | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Abr | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | May | 1      | 1      |        | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Jun | 1      |        |        |        | 1      | 1      | 1      |
|              | Jul |        |        |        |        | 1      |        | 1      |
|              | Ago |        |        |        |        | 1      |        | 1      |
|              | Sep | 1      |        |        | 1      | 1      |        | 1      |
|              | Oct | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      |
|              | Nov | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 1      |
|              | Dic | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      |
| 60%          | Ene | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      |
|              | Feb | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Mar | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Abr | 2      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 2      |
|              | May | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 2      |
|              | Jun | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 1      |
|              | Jul | 1      | 1      |        | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Ago | 1      |        |        |        | 1      | 1      | 1      |
|              | Sep | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      | 1      |
|              | Oct | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 2      | 2      |
|              | Nov | 1      | 1      | 1      | 1      | 3      | 2      | 2      |
|              | Dic | 1      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 2      |
| 75%          | Ene | 1      | 2      | 1      | 2      | 2      | 2      | 3      |
|              | Feb | 1      | 1      | 1      | 2      | 2      | 2      | 2      |
|              | Mar | 2      | 2      | 1      | 2      | 2      | 2      | 2      |
|              | Abr | 3      | 2      | 2      | 2      | 3      | 3      | 3      |
|              | May | 2      | 2      | 2      | 2      | 3      | 3      | 3      |
|              | Jun | 2      | 1      | 1      | 2      | 3      | 2      | 2      |
|              | Jul | 2      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 2      |
|              | Ago | 2      | 1      | 1      | 1      | 2      | 1      | 2      |
|              | Sep | 2      | 2      | 1      | 2      | 2      | 2      | 1      |
|              | Oct | 2      | 2      | 2      | 2      | 3      | 3      | 3      |
|              | Nov | 2      | 2      | 2      | 2      | 4      | 3      | 3      |
|              | Dic | 2      | 2      | 2      | 2      | 3      | 3      | 3      |

Finalmente, puede decidir aplazar la realización de la labor para otro momento del mes de abril en el que esta pueda realizarse. En ese caso, con base en la Ecuación 8, el decisor puede definir, teniendo en cuenta la condición del momento, la probabilidad de que el comportamiento de la lluvia cambie o se mantenga en los siguientes días (Tabla 4). En este caso, la condición del momento se refiere al número de días lluviosos consecutivos ocurridos hasta el

momento. Con base en la ecuación ya referenciada (Ecuación 8), se puede determinar la probabilidad de que haya  $n$  número de días más con lluvia dado que ya llovieron  $n$  días consecutivos (Tabla 4). Después de dicha consulta, el abanico de decisiones es el mismo que el del ejemplo anterior (Figura 8). La Tabla 5 muestra las probabilidades de ocurrencia de diferentes eventos en un mes seco (agosto) en la misma zona (zona 6).

**Tabla 4.** Probabilidad de que llueva más días (F↓), dado que llovió el número de días (P→). Mes de Abril. Zona climática 6

| F↓ | P→ | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  |    | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 2  |    | 0.6 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3  |    | 0.4 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 4  |    | 0.3 | 0.4 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5  |    | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 6  |    | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 7  |    | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 8  |    | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |
| 9  |    | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |
| 10 |    | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |     |
| 11 |    | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |     |
| 12 |    | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |     |     |     |
| 13 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 1.0 |     |     |
| 14 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 1.0 |     |
| 15 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 1.0 |
| 16 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.7 |

**Tabla 5.** Probabilidad de que llueva más días (F↓), dado que llovió el número de días (P→). Mes de Agosto. Zona Climática 6

| F↓ | P→ | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  |    | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 2  |    | 0.4 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3  |    | 0.2 | 0.4 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 4  |    | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5  |    | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 6  |    | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 7  |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 8  |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |     |
| 9  |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |     |
| 10 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |     |
| 11 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |     |
| 12 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |     |
| 13 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |     |     |
| 14 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 1.0 |     |
| 15 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 |
| 16 |    | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.5 |

## Conclusiones

El número medio mensual de rachas y la longitud media mensual de las rachas de lluvia, varía espacialmente. En la zona media del valle del río Cauca (zonas 2, 3 y 4) estos índices adquieren valores bajos durante las temporadas secas y altos durante las lluviosas. Sin embargo, en el sur, zonas 6 y 7, y en el norte, zonas 1 y 5, solo varía la longitud media mensual de la racha a través del año. En el norte y en el sur el número de rachas no varía significativamente entre meses, mostrando que los procesos de pluvio-génesis son más locales en dichas zonas. Esta información muestra que el ciclo anual del total de lluvia mensual difiere de la forma en la que se dispone esta a través del mes y que es de vital importancia para el manejo de cultivos que, como en el caso de la caña de azúcar, las labores son, en su mayoría, mecanizadas. Es importante dado que realizar labores agrícolas en el momento no apropiado, o no realizarlas por efecto del clima, determina reducciones en la productividad. Realizar las labores en forma oportuna durante días en los que el suelo no tiene la condición óptima (suelos humedecidos) genera pérdida productiva a largo plazo y reducción en la rentabilidad, asociada a la inversión en labores de mitigación del daño causado. Las rachas de lluvia, generadas a partir de la información diaria, permiten determinar la probabilidad de que se mantengan condiciones lluviosas en diferentes escenarios mes x zona, en condiciones del valle del río Cauca.

## Referencias

Arias, J., Morales, T. y Suárez, A. (2016). Socio-economic aspects and perceptions of sugarcane cutters about mechanization in Risaralda, Colombia. *Scientia et Technica*, 21(1), 69-74.

Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia (Asocaña). 2017. Sector azucarero colombiano en cifras 2016. <https://www.asocana.org/documentos/252016-B27E6326-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,FFFFFF,2D2D2D,A3C4B5,D2D2D2.pdf>

Carbonell, J., Amaya, A., Ortiz, B., Torres, J., Quintero, R. y Isaacs, C. (2001). *Zonificación Agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (Tercera Aproximación)*. Serie Técnica 29, Cenicaña, Colombia. [https://www.cenicana.org/pdf\\_privado/serie\\_tecnica/st\\_29/st\\_29.pdf](https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_29/st_29.pdf)

Cortés, E., Chica, A. y Peña, A. (2019). Zonas climáticas del valle del río Cauca. *Carta Informativa Cenicaña*, 7(1), 10-11.

Cortés, E. y Barrios, C. (2010). Nuevo calendario de temporadas secas y lluviosas en el valle del río Cauca. *Carta Trimestral Cenicaña*, 32(3-4), 4-5.

Erickson, B. (2006). *Precision agriculture in Colombian sugar cane*. Site Specific Management Center Newsletter. [https://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/frames/ssmcnewsletter9\\_2006.pdf](https://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/frames/ssmcnewsletter9_2006.pdf)

Guan, S., Nakamura, M., Shikanai, T. y Okazaki, T. (2008). Hybrid Petri nets modeling for farm workflow. *Computers and electronics in agriculture*, 62(2), 149-158.

Henry, J. (2005) Tropical and Equatorial Climates. En J.E. Oliver (Ed.), *Encyclopedia of World Climatology*. Springer. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8\\_212](https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_212)

Hogg, R., McKean, J. y Craig, A. (2019). *Introduction To Mathematical Statistics*. (Eighth Edition). Pearson Education, Inc.

Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Cenicafé.

Lloyd-Smith, J.O. (2007). Maximum Likelihood Estimation of the Negative Binomial Dispersion Parameter for Highly Overdispersed Data, with Applications to Infectious Diseases. *PLoS ONE*, 2(2), e180. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000180>

Peña, Q.A.J., Cortes, E. y Montealegre, F. (2001). Incidencia de los fenómenos El Niño y La Niña sobre las condiciones climáticas en el valle del río Cauca, Parte I. Análisis climatológico. *Meteorología Colombiana*, 3, 103-128.

Porrás, V. (1995). Labores de Cultivo. En C. Cassalet, J. Torres, y C. Isaacs (Eds.), *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 179-190). Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña).

Preciado Vargas, M., Chica Ramírez, H.A., Solarte Rodríguez, E., Carbonell González, J.A., y Peña, A.J. (2020). Regional wind pattern, a basis for defining the appropriate lapse of time for sugarcane burning in the Cauca Valley (Colombia). *Environment, Development and Sustainability*, 23, 9477-9492.

Ramírez Builes., V.H. y Jaramillo Robledo, A. (2009). Relación entre el Índice Oceánico de El Niño (ONI) y la lluvia en la región andina central de Colombia. *Revista Cenicafé*, 60(2):162-173.

Taylor, L., Woiwod, I. y Perry, J. (1979). The Negative Binomial as a Dynamic Ecological Model for Aggregation, and the Density Dependence of k. *Journal of Animal Ecology*, 48(1), 289-304. <https://doi.org/10.2307/4114>

Wallace, A.R. (1878). *The Climate and Physical Aspects of the Equatorial Zone. Tropical Nature and Other Essays*. <http://people.wku.edu/charles.smith/wallace/S288.htm>

World Meteorological Organization (WMO). (2008). *Guide to meteorological instruments*. Seventh edition. Autor. <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>

Zea, J., Eslava, J. y León, G. (2000). Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana* 1, 31-38.