

ÍNDICES PARA EVALUAR EL ESTADO HÍDRICO EN LOS CAFETALES

Víctor Hugo Ramírez-Builes*; Álvaro Jaramillo-Robledo**; Jaime Arcila-Pulgarín*

RESUMEN

RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A.; ARCILA P., J. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. Cenicafé 61(1):55-66.2010.

Tanto el déficit como el exceso de agua en el suelo afectan el comportamiento fenológico y la producción de café y su comportamiento fenológico. En este trabajo se proponen varios índices hídricos que puedan ser empleados con el propósito de identificar períodos críticos de déficit o exceso hídrico para el cultivo en Colombia. Los índices se desarrollaron a partir de la integración de las relaciones hídricas del cultivo, de las propiedades físicas del suelo, de algunas variables meteorológicas y de la aplicación de la técnica de balance hídrico. Los índices propuestos son: índice de déficit hídrico (IDH), índice de exceso hídrico (IEH) e índice de humedad del suelo (IHS). En este trabajo se presenta el desarrollo conceptual de los índices y ejemplos de aplicación, considerando años contrastantes en la distribución y cantidad de las lluvias. El IDH y el IHS fueron relacionados con medidas de campo de la humedad del suelo en cafetales productivos, encontrándose que los índices siguen la tendencia de la humedad del suelo.

Palabras clave: Índices hídricos, humedad del suelo, exceso hídrico, déficit hídrico.

ABSTRACT

Both soil water deficit and water excess affect coffee production and its phenological behavior. This study proposes some hydric indices that can be used with the purpose of identifying critical periods of hydric deficit or excess for coffee cultivation in Colombia. The indices were developed based on the integration among crop hydric relations, soil physical characteristics, some meteorological variables and the hydric balance technique application. The indices proposed are: *Water deficit index* (WDI), *water excess index* (WEI) and *soil moisture index* (SMI). This study indicates the conceptual development of the indices and application examples, considering years contrasting in the distribution and amount of rainfall. The WDI and SMI were related with field measurements of the soil moisture in productive coffee plantations, and the results show that these indices follow the tendency of the soil moisture.

Keywords: Soil indices, soil moisture, hydric excess, hydric deficit.

* Asistente de Investigación e Investigador Principal. Fitotecnia. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Investigador Científico III. Agroclimatología. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

El cultivo de café en Colombia depende exclusivamente del aporte hídrico que hacen las lluvias; por lo tanto, la estacionalidad de la cosecha se relaciona directamente con la distribución de los períodos secos y húmedos (21).

Tradicionalmente, los estudios de disponibilidad hídrica se hacen con el propósito de diseñar sistemas de riego o drenaje agrícola, pero además, en zonas como la cafetera colombiana en donde para el cultivo de café no se usa riego, conocer la disponibilidad hídrica del cultivo permite definir épocas de siembra, evaluar la magnitud y la distribución de la floración y de la cosecha, determinar prácticas agronómicas del cultivo como la fertilización, el manejo de arvenses, la renovación de cafetales, los controles fitosanitarios y el efecto de los excesos y los déficit hídricos sobre la producción de café.

Desde la década del 70, Frere *et al.* (9) emplearon el modelo de balance hídrico en zonas andinas de Suramérica, incluida la zona cafetera de Colombia, con el propósito de monitorear la distribución y la disponibilidad hídrica del cultivo; posteriormente, Jaramillo (19) ajustó los cálculos de balance hídrico, empleando lluvia probable e incluyendo un mayor número de estaciones meteorológicas. Actualmente la técnica del balance hídrico se emplea para evaluar el efecto de los Fenómenos de El Niño y La Niña en zona cafetera (13,14), y para la zonificación agroecológica, como los ecotopos cafeteros (12).

Recientemente se determinó la correlación de un índice de humedad del suelo, estimado a partir del balance hídrico, con el proceso de floración del café (2, 3), con la influencia de los Fenómenos de El Niño y La Niña (27), y con prácticas de manejo de cultivo y sistemas agroforestales (7).

Los índices hídricos han sido ampliamente utilizados en el mundo, con el fin de conocer el agua disponible en los cultivos en la zona de raíces, y conocer su impacto en la producción y fenología de los cultivos (2, 5, 16, 24, 26, 32). Dentro de los índices hídricos más comunes empleados a nivel mundial se destaca el índice de severidad de sequía de Palmer-PDSI, propuesto por Palmer en 1965 (26). El PDSI estima las anomalías en el suministro de humedad del suelo y tiene como objetivo realizar una medida de las condiciones de humedad del suelo que fuera “estandarizada”, de manera que pudiera ser comparado entre localidades y entre meses; éste es un índice esencialmente meteorológico basado en datos de precipitación, temperatura y datos locales de agua disponible en el suelo o capacidad de almacenamiento y es, por lo tanto, un índice derivado del balance hídrico. El índice de Palmer ha sido ampliamente empleado por el servicio de agricultura de los Estados Unidos (15), y una de sus características es que tiene rangos que oscilan entre extremadamente seco a extremadamente húmedo.

Posteriormente, Palmer en 1968, citado por Mavi y Tupper (25), desarrolló otro índice llamado índice de humedad de suelo (CMI), para el cual se utiliza información meteorológica y puede ser empleado para monitorear cambios en la humedad del suelo a nivel semanal.

En el año de 1977, Hargreaves (31) propuso un índice de humedad que resulta de dividir la precipitación sobre la evapotranspiración potencial, este índice tiene categorías desde muy deficiente a excesivo, y una desventaja de este índice es que sólo considera variables meteorológicas. Varios autores (8, 25) citan el índice de sequía de Bhalme y Mooley (BMDI), el cual es una versión simplificada del índice de Palmer, y al igual que el PDSI, oscila entre extremadamente húmedo a extremadamente seco.

Edwards *et al.* (6), citan el índice estandarizado de precipitación (PSI) desarrollado por McKee, N. J. Doesken y John Kleist en 1993; este índice estima las variaciones en la precipitación a escala multi-temporal, y asume que el déficit de precipitación afecta la recarga de agua en acuíferos y nacimientos, al igual que la humedad del suelo, y se calcula a partir de información histórica de precipitación.

Idso (16) desarrolló el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI), el cual se estima a partir de medidas *in situ* de variables como temperatura del aire, temperatura de las hojas y déficit de presión de vapor. Es un índice que se ha popularizado gracias a la disponibilidad de sensores de infrarrojo para medir la temperatura de las plantas y de estaciones meteorológicas portátiles, que pueden ubicarse dentro de los cultivos (17, 29); pero tiene como desventaja la necesidad de medir simultáneamente en el campo, la temperatura de las hojas, del aire y déficit de presión de vapor del aire. Además, es un índice de estrés hídrico que no incluye el exceso hídrico. El CWSI es un índice inverso al índice de déficit hídrico propuesto en este estudio, con una escala que va de 0 a 1,0 donde cero indica que no hay estrés hídrico, lo que significa que la evapotranspiración real del cultivo es igual a la máxima, y el valor de 1,0 indica el máximo estrés, en donde la evapotranspiración real es cercana a cero.

Recientemente y con el avance en las técnicas de teledetección, se han desarrollado índices espectrales de vegetación, que se emplean, entre otros, para inferir sobre el estado de humedad del suelo. Uno de los más empleados ha sido el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) desarrollado por Rouse y colaboradores en 1973, citados por Viña *et al.* (36).

Todos los índices anteriores tienen como objetivo común estimar las variaciones de humedad en el suelo en áreas con coberturas vegetales, pero ninguno de ellos considera dentro de sus cálculos la dinámica del agua dentro del cultivo, debido a lo complejo y específico del proceso; tampoco los índices anteriores definen un valor crítico de exceso hídrico, debido a que su enfoque ha sido monitorear el estrés hídrico por déficit o sequía agrícola. Como en el cultivo de café en Colombia se ha avanzado en el conocimiento de la técnica de balance hídrico (19), en conocer la distribución de la lluvia dentro del cultivo (10, 20, 23, 28, 35) y en evaluar el efecto de la humedad del suelo sobre la fotosíntesis (11) y sobre la floración (2), es posible proponer unos índices hídricos específicos para el cultivo de café que ayuden a identificar, a partir de la integración de variables edáficas, del cultivo y meteorológicas, los puntos críticos de déficit y de exceso hídrico.

El presente trabajo busca desarrollar índices hídricos que integren la información meteorológica, la distribución de la lluvia dentro del cultivo, la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, las características del cultivo, como edad y densidad de siembra, y el efecto de la humedad del suelo sobre la fotosíntesis, para que sirvan como herramienta de zonificación agroclimática del cultivo de café y para monitorear el estado hídrico de los cultivos en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los índices que se pueden emplear a este respecto son: i) evapotranspiración relativa (ET_r/ET_m), ii) índice de déficit de evapotranspiración ($1 - ET_r/ET_m$), o iii) índice de humedad del suelo (por ejemplo, θ_r/θ_{cc} -humedad volumétrica actual respecto a la humedad volumétrica a capacidad de campo). Para el café se propusieron tres índices a saber:

Índice de evapotranspiración relativa o de déficit hídrico. Bajo condiciones de apropiado contenido de agua en el suelo todo cultivo tiene una evapotranspiración máxima (ET_m) que está en función de variables atmosféricas como la energía disponible, el déficit de presión de vapor, la velocidad del viento, y de variables agronómicas como el porcentaje de cobertura (densidad de siembra) y la edad (estado fenológico), las cuales se integran en el coeficiente de cultivo (K_c), y el agua disponible en el suelo. A medida que el suelo se seca, la evapotranspiración máxima del cultivo disminuye y se convierte en evapotranspiración real (ET_r). La magnitud del estrés hídrico de un cultivo por déficit se estima en función de la reducción de la evapotranspiración real (ET_r) respecto a su valor máximo (ET_m) (Ecuación <<1>>).

La ET_m es producto de:

$$ET_m = ET_o * K_c \quad \text{<<1>>}$$

En donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia
 K_c : Coeficiente de cultivo

Para zona cafetera, la ET_o se estima a partir de los modelos propuestos por Jaramillo (22), en función de la altitud o a partir de lecturas del tanque de evaporación clase A. Si se cuenta con información meteorológica completa para la zona, se recomienda el modelo de Penman-Monteith, propuesto por la FAO (1), o los modelos de García y López modificado por Jaramillo (18) o el de Hargreaves modificado por Ramírez *et al.* (30).

Los valores de K_c para café en Colombia no se han medido; por lo tanto, se usan valores de K_c en función de la edad y la densidad de siembra, propuestos por Santinato *et al.* (1996), y Da Silva (4), en la Tabla 1.

La ET_r se estima a partir del modelo de balance hídrico de Thornwaite-Mather, modificado por Jaramillo (19), de la siguiente manera:

En la zona de raíces el suelo puede retener agua a una máxima capacidad conocida como capacidad de almacenamiento de agua (C.A.). La C.A. depende de la textura del suelo,

Tabla 1. Valores de K_c para café en Brasil, propuestos por Santinato *et al.* (1996), (33) Da Silva (4).

Edad (Años)	Espaciamiento entre plantas	Valores de K_c
Adulto > 3 años	a) >3,0x1,0 = 2.500 plantas /ha	1,0
	b) >3,0x1,0 = 3.333 plantas/ha	1,1
	c) 2,0 a <3,0x1,0 = 6.666 plantas/ha	1,2
	d) 1,0 a <2,0x1,0 = 13.333 plantas/ha	1,3
Nuevo 1 a 3 años	a) >3,0x1,0 = 2.500 plantas /ha	0,8
	b) >3,0x1,0 = 3.333 plantas/ha	0,9
	c) 2,0 a <3,0x1,0 = 6.666 plantas/ha	1,0
	d) 1,0 a <2,0x1,0 = 13.333 plantas/ha	1,1
Nuevo 0 < 1 año	a) >3,0x1,0 = 2.500 plantas /ha	0,6
	b) >3,0x1,0 = 3.333 plantas/ha	0,7
	c) 2,0 a <3,0x1,0 = 6.666 plantas/h	0,8
	d) 1,0 a <2,0x1,0 = 13.333 plantas/ha	0,9

específicamente de la curva de retención de humedad, y de la profundidad efectiva de raíces (Pfr) y se estima según se muestra en la Ecuación <<2>>.

$$C.A = Pfr (\theta_{v,cc} - \theta_{v,pmp}) \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

Donde:

$\theta_{v,cc}$: Humedad volumétrica a capacidad de campo o agua retenida a -33 kPa. en mm%

$\theta_{v,pmp}$: Humedad volumétrica a punto de marchitez permanente o agua retenida a -1.500 kPa, %

Cuando el agua retenida en el perfil del suelo es igual a su máxima capacidad de retención, el cultivo está evapotranspirando a su máxima capacidad (Ecuación <<3>>), por lo tanto:

$$ET_r = ET_m \quad \langle\langle 3 \rangle\rangle$$

Cuando el suelo empieza a secarse, la ET_r decrece en función de la relación H.A./C.A., en donde H.A. es la humedad almacenada. La H.A. se calcula de la siguiente manera (Ecuación <<4>>):

$$H.A. = C.A * \exp^{(N.A./C.A)} \quad \langle\langle 4 \rangle\rangle$$

En donde, la humedad almacenada está en función del negativo acumulado (N.A.= Precipitación efectiva ($P_{efc} - ET_m$)), solamente para períodos secos, y la ET_r se calcula de acuerdo con la Ecuación <<5>>.

$$ET_r = (P_{efc * i} - E_{sc}) + H.A_{i-1} - H.A_i \quad \langle\langle 5 \rangle\rangle$$

En donde, E_{sc} es la escorrentía, y junto con $P_{efc.i}$ se puede estimar a partir de los trabajos de Jaramillo y Cháves (23), Ramírez y Jaramillo (28) o Velásquez y Jaramillo (35-), para café a libre exposición solar.

El índice de evapotranspiración relativa o de deficiencia hídrica (Ecuación <<6>>) es igual a:

$$IDH = \frac{ET_m}{ET_r}; 0 \leq IDH \leq 1,0 \quad \langle\langle 6 \rangle\rangle$$

Índice de humedad del suelo. Con el propósito de contar con un índice que permita evaluar el exceso hídrico en el suelo, se propuso el siguiente modelo que se acopla al balance hídrico.

Para el cálculo de este índice se debe conocer la humedad a saturación del suelo (θ_s , que es el agua retenida a una presión de succión de 0 kPa y que es más o menos igual a la porosidad del suelo- ϕ) y la humedad del suelo a capacidad de campo (θ_{cc} , que es el agua retenida a una succión de -33 kPa) (Tabla 2).

Para calcular el exceso hídrico se estimó una capacidad de exceso hídrico del suelo (CEH) (Ecuación <<7>>), que es igual a:

$$CEH = \theta_s - \theta_{cc} \quad \langle\langle 7 \rangle\rangle$$

En donde θ_s es aproximadamente igual a ϕ (Ecuación <<8>>), θ_s y θ_{cc} en mm.

$$\phi = \left[1 - \frac{\delta_a}{\delta_r} \right] \quad \langle\langle 8 \rangle\rangle$$

Donde:

- ϕ : Porosidad
- δ_a : Densidad aparente, en g.cm⁻³
- δ_r : Densidad real, en g.cm⁻³.

Con la CEH se puede estimar un índice de exceso hídrico de la siguiente manera:

Tabla 2. Rangos de humedad del suelo en función de la presión de succión.

Nombre	Notación	Presión de succión (kPa)	Valores típicos de agua* (cm ³ .cm ⁻³)	Característica
Contenido de agua a saturación	θ_s	0	0,46-0,76	El suelo está completamente saturado de agua
Capacidad de campo	θ_{cc}	-33	0,15-0,65	Humedad del suelo entre 1 y 3 días después de saturado
Punto de marchitamiento permanente	θ_{pmp}	-1.500	0,09-0,46	Valor mínimo de agua en donde las plantas se marchitan completamente
Humedad residual	θ_r	$-\infty$	-----	Agua remanente a una alta presión de succión

*Valores promedio de 76 unidades de suelos de la zona cafetera colombiana (33).

Primero, se ajusta el exceso hídrico, cuando éste es mayor que la capacidad de exceso hídrico (CEH), el exceso ajustado es igual a CEH, y cuando el exceso hídrico es menor que CEH, el exceso ajustado es igual al exceso. El exceso ajustado = CEH

Cuando el exceso hídrico es menor que CEH. El exceso ajustado = Exceso

Posteriormente, se calcula el índice de exceso hídrico (IEH), Ecuación <<9>>

$$IEH = \frac{Exc. Ajustado}{CEH}; 0 \leq IEH \leq 1,0$$

<<9>>

Sí:

$IEH = 1,0$. Exceso ajustado: capacidad de exceso (todo el espacio poroso del suelo está lleno de agua).

$IEH = 0,0$. Exceso ajustado = 0,0 (no hay exceso hídrico).

La desventaja del índice anterior es que no ha sido ajustado en el campo para definir un nivel crítico para café ni para otros cultivos. Con el propósito de definir un rango crítico se acudió al trabajo de Gómez (11), en donde se relacionó la fotosíntesis de café (A) con la humedad volumétrica del suelo (suelo unidad Chinchiná); en ese trabajo se encontró que había un rango de humedad del suelo en donde A era óptima (0,30 a 0,35 cm³.cm⁻³). Basados en ese trabajo, se propuso el tercer índice.

Índice de humedad del suelo. Para café con el índice de humedad de suelo (IHS) propuesto se lograron identificar los niveles críticos de déficit y exceso hídrico para el cultivo de café, y se calculó de acuerdo con la Ecuación <<10>>.

$$IHS = \frac{\theta_i}{\theta_s} \quad \text{<<10>>$$

Donde:

θ_i : Humedad volumétrica actual, en mm

θ_s : Humedad volumétrica a saturación, en mm

Si IHS

$\left[\begin{array}{l} \geq 0,6 \text{ hay restricciones en fotosíntesis por exceso hídrico} \\ = 1,0 \text{ todos los espacios porosos están ocupados por agua} \\ < 0,3 \text{ hay restricciones en fotosíntesis por déficit hídrico} \\ = 0,0 \text{ el suelo está seco} \end{array} \right]$

Aplicación de los índices. Con el propósito conocer el comportamiento de la humedad del suelo en diferentes localidades de la zona cafetera a partir de la aplicación de los índices, se tomó información meteorológica a nivel diario de cinco localidades de la zona cafetera, ubicadas a lo largo del país (Tabla 3), las cuales consideraban años bajo la presencia de eventos extremos como El Niño, La Niña y Neutros.

En la Tabla 4, se listan las características hidrofísicas de los suelos, para cada una de las zonas consideradas en el análisis.

En el campo se tomaron medidas directas de la humedad volumétrica, en un cafetal adulto en Cenicafé (05°00'N-75°36' O, y 1.425 m.s.n.m.), en 1997, en una parcela de

café variedad Colombia a libre exposición solar, sembrado a 2,0 m entre surcos y 1,0 m entre plantas.

Las medidas de humedad del suelo se tomaron con un equipo de reflectometría (TDR), a 20 y 40 cm de profundidad simultáneamente, para un total de 49 medidas por profundidad. Para efectos de este estudio, se tomaron las medidas a 20 cm de profundidad, y se tomaron los datos de la estación meteorológica de Cenicafé, cercana a los lotes donde se realizaron las medidas de humedad. Se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_0) empleando el modelo de García y López modificado por Jaramillo (18) para zona cafetera, y el coeficiente de cultivo (K_c) empleado fue de 1,1 para un cafetal denso y adulto.

Para el cálculo de los índices se aplicaron los modelos para lluvia efectiva y escorrentía, y se tomaron los datos de las propiedades hidrofísicas del suelo, humedad a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidades real y aparente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los índices propuestos son útiles en estudios como los de zonificación agroclimática del cultivo de café. Por ejemplo, para la zona

Tabla 3. Ubicación de las estaciones consideradas para la aplicación de los índices.

Estación	Departamento	Cordillera/vertiente	Latitud Norte	Longitud Oeste
Pueblo Bello	Cesar	Sierra Nevada de Santa Marta	10°25'	73°34'
El Rosario	Antioquia	Central/occidental	05°53'	73°34'
Naranjal	Caldas	Central/occidental	04°58'	75°39'
Paraguaicito	Quindío	Central/occidental	04°24'	75°44'
Manuel Mejía	Cauca	Central/occidental	02°24'	76°44'

Tabla 4. Características hidrofísicas de los suelos considerados en el estudio (Base de datos Cenicafé).

Localidad	Densidad aparente	Retención de agua a -33 kPa	Retención de agua a -1.500 kPa	Capacidad de almacenamiento a 20 cm
	g.cm^{-3}	%		mm
Naranjal, Caldas	0,70	48,0	29,4	55,8
El Rosario, Antioquia	0,84	36,8	26,0	32,4
Manuel mejía, Cauca	0,70	58,8	46,8	36,0
Paraguaicito, Quindío	0,70	19,7	10,0	29,1
Pueblo Bello, Cesar	0,84	36,8	26,0	32,4

de influencia de la Estación Central Naranjal (Figura 1), se observa que durante el año 2008 el índice de humedad de suelo (IHS) presentó, durante 251 días del año, valores considerados en este estudio como críticos por el exceso hídrico para el cultivo de café ($\text{IHS} > 0,6$); la mayor frecuencia de observación de estos valores se registró en el período de abril a diciembre, lo cual se atribuye a la ocurrencia del Fenómeno de La Niña, el cual se inició en el mes de abril y se extendió hasta mediados del año 2009.

En el año 2007 la misma zona sólo presentó 63 días con $\text{IHS} > 0,6$ (Tabla 5, Figura 1); por lo tanto, se puede afirmar que el IHS es un buen indicador para evaluar el efecto de dicho fenómeno atmosférico sobre la dinámica de la humedad del suelo y de la disponibilidad hídrica del cultivo de café.

Por otra parte, el déficit hídrico en café puede ser monitoreado empleando tanto el índice de evapotranspiración relativa o déficit hídrico, como el índice de humedad del suelo (Tabla 5).

En la Tabla 5 se presenta la distribución de los índices hídricos para seis localidades de la zona cafetera, para años climáticamente contrastantes.

Relación entre los índices hídricos y la humedad del suelo. Se observa que los índices mantienen la tendencia de la humedad del suelo (Figura 2); en la medida en que la humedad volumétrica se acerca al valor correspondiente a capacidad de campo (θ_{cc}), el índice de déficit hídrico es cercano a uno (1,0), y en la medida en que la humedad disminuye, el índice también disminuye. Una vez la humedad del suelo alcanza valores inferiores a la humedad del punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), el índice alcanza su límite inferior ($\text{IDH} = 0,2$).

Para la serie de lecturas de humedad empleadas, se observa que la humedad volumétrica medida, en ningún caso excedió o igualó a la capacidad de campo (θ_{cc}), por lo tanto, el índice de humedad del suelo (IHS) fue inferior a 0,6 (Figura 2). Cuando

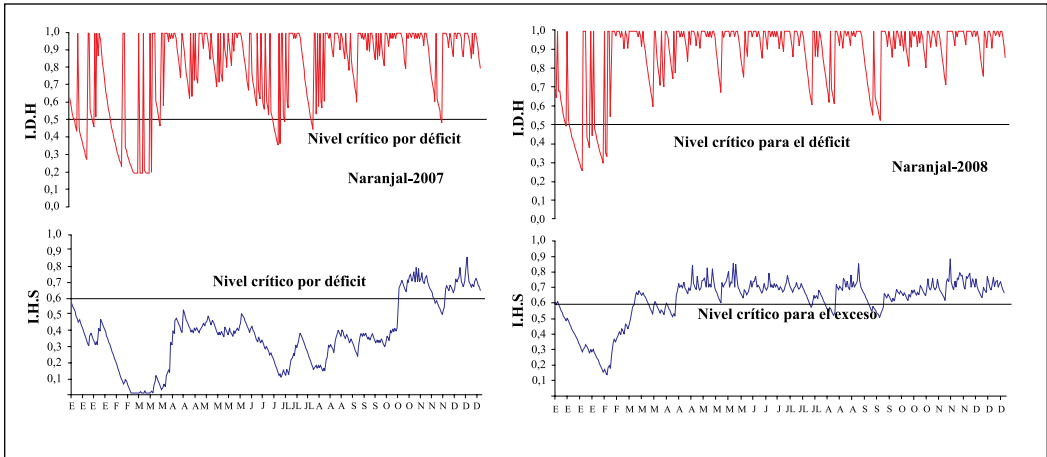


Figura 1. Distribución de los índices hídricos para la zona de influencia de la Estación Central Naranjal (Chinchiná, Caldas), bajo la presencia del Fenómeno de La Niña (2008) y sin efecto climático (2007).

Tabla 5. Distribución de los índices hídricos para diferentes localidades de la zona cafetera de Colombia para años contrastantes en la distribución y cantidad de las lluvias. Calculado a una profundidad de raíces de 30 cm.

Departamento	Estación	Año	Número de días del año			
			Con IHS			Con IDH
			<0,3 Crítico por déficit	>0,6 Crítico por exceso	0,3 < >0,6 Optimo	<0,5 Crítico por déficit
Caldas	Naranjal	2007	116	63	185	56
		2008	23	251	90	25
		2009	10	189	165	22
		1997	183	38	143	118
		1998	91	184	89	64
		1999	51	189	127	31
Antioquia	El Rosario	2007	104	45	216	79
		2008	12	67	286	35
		2009	302	0	63	100
		1997	183	6	176	128
		1998	71	34	260	76
		1999	43	45	277	30
Cesar	Pueblo Bello	2007	104	45	216	79
		2008	242	18	105	162
		2009	298	6	61	209
Quindío	Paraguacito	2007	279	0	86	120
		2008	267	0	98	132
		2009	338	0	27	175
		1997	282	2	81	176
		1998	311	0	54	171
		1999	279	0	86	124
Cauca	Manuel Mejía	2007	105	198	62	148
		2008	97	221	47	79
		2009	175	136	54	136
		1997	163	153	49	150
		1998	224	75	66	189
		1999	93	218	54	104

los valores de humedad medida estuvieron por debajo de los niveles inferiores (humedad de punto de marchitez) el índice fue cero o cercano a cero.

Lo anterior significa que los índices explican bien la tendencia del agua disponible para el cultivo de café, a partir de medidas meteorológicas a nivel diario, y considerando las características del suelo y del cultivo.

Los índices hídricos propuestos integran las variables del clima, del cultivo y del suelo permitiendo conocer los excesos y las deficiencias de agua de los cafetales y de las regiones cafeteras; se sugiere su empleo en los futuros estudios de zonificación agroclimática del cultivo de café en Colombia.

Los índices propuestos se deben de emplear a nivel diario; es importante avanzar en investigaciones a nivel regional, que faciliten el conocimiento de las relaciones hídricas del cultivo, en sus diferentes etapas de desarrollo y bajo diferentes sistemas de producción, de igual manera, es importante avanzar en estudios sobre las propiedades hidrofísicas del suelo en algunas regiones cafeteras del país, con el propósito de mejorar el nivel de detalle de los estudios de disponibilidad hídrica para el cultivo bajo diferentes escenarios climáticos. Por otra parte, los índices anteriores se constituyen en una herramienta importante para avanzar en estudios sobre amenaza y riesgo climático y, en general, en estudios de zonificación, al igual que en la modelación de la producción potencial del cultivo, entre otras.

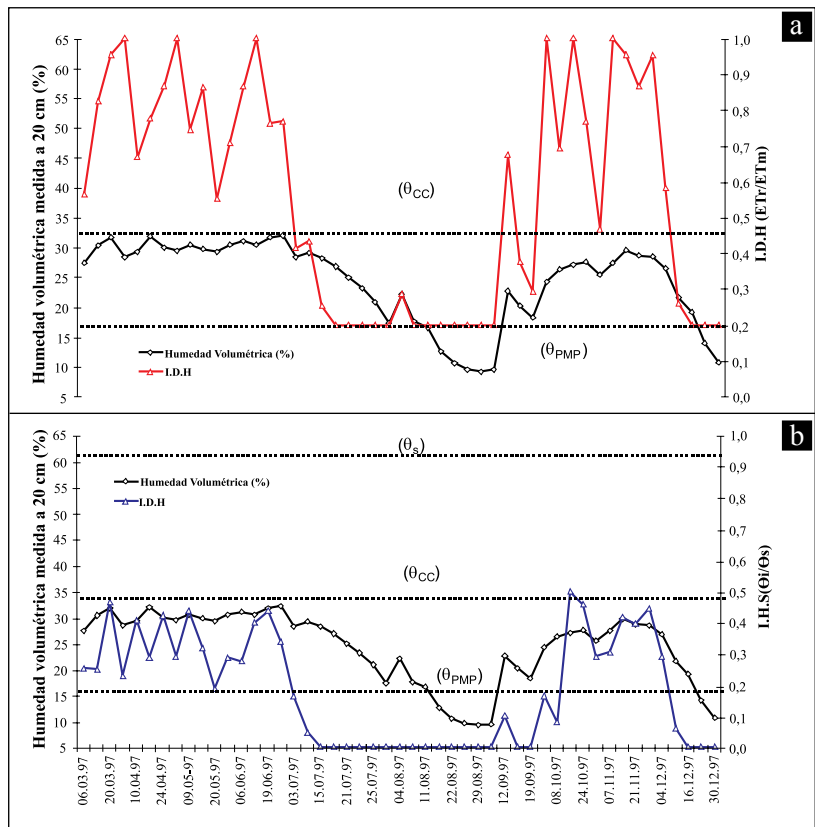


Figura 2. Relación entre la humedad volumétrica medida en un cafetal adulto y los índices de humedad del suelo. a) con el índice de déficit hídrico ó evapotranspiración relativa. b) con del índice de humedad del suelo.

LITERATURA CITADA

1. ALLEN, G. R.; S, L PEREIRA.; D. RAES., ; M. SMITH. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). Publication No. 56. Rome. 300p.
2. ARCILA, P. J.; JARAMILLO, R. A. 2003. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del café. Avances Técnicos Cenicafé No. 311. 8p.
3. CAMAYO, V., G. C.; CHAVES, C., B.; ARCILA, P. J.; JARAMILLO, R. A. 2003. Desarrollo floral del café y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. Cenicafé 54(1):35-49.
4. Da SILVA, A.L. 2005. Variabilidade dos componentes do balanço hídrico: um estado de caso em uma cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no Brasil. Tesis de Doctor (Ph.D) en Agronomía/Universidad de Sao Pablo - Escuela Superior de Agricultura Luiz do Queiroz. Brasil. 73p.
5. EMEKLI, Y.; BASTUG, R.; BUYUCTAS, D., YASEMIN, E.N. 2007. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of Bermuda grass. Agricultural Water Management, 90(3):205-212.
6. EDWARDS, C.D.; McKEE, B.T.; DOESKEN, J.N.; y KLEIST, J. 1997. Hystorical analysis of drought in the United States. Seventh Conference on Climate variations in 77 American Meterologyc Society Meeting. Long Beach-California. 4p.
7. FARFÁN, V. F.; JARAMILLO, R. A. 2008. Efecto de la cobertura vegetal muerta y arbórea sobre la disponibilidad de agua en el suelo en sistemas agroforestales con café. Cenicafé 59(1):39-54.
8. FREITAS, A.S.M.; BILLIB, A.H.M. 1997. Drought prediction and characteristic analysis in semiarid Ceará, northeast Brazil. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proceeding of the Rabat Symposium, S1) AIHS Publ. N° 240:105-112.
9. FRERE, M.; RIJKS, J. Q.; REA, J. 1975. Estudio agroclimatológico de la zona andina. FAO/UNESCO/ OMM. 375p.
10. GIRALDO, J. J. F.; JARAMILLO, R. A. 2004. Ciclo hidrológico y transporte de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo. Cenicafé 55(1):52-68.
11. GÓMEZ, M. O. 2000. Efecto del estrés hídrico sobre la actividad fotosintética en la planta de café (*Coffea arabica* L. c.v, Colombia). Tesis de Grado de Ing. Agrónomo. Universidad de Caldas. 68p.
12. GÓMEZ, G.L.; CABALLERO, R.A.; BALDIÓN, R. J.V. 1991. Ecotopos cafeteros. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 138p.
13. GUZMÁN M., O.; BALDIÓN R., J. V. 1997. El evento cálido del Pacífico en la zona Cafetera. Cenicafé 48(3):141-155.
14. ----- 1999. Influencia del evento frío del Pacífico en la zona cafetera Colombiana. Cenicafé 50(3):222-237.
15. HAYNES, J. M. Drought indices. National Drought Mitigation Center. En: <http://drought.unl.edu/whatis/indices.htm>. Consultado en Marzo de 2010. 16p.
16. IDSO, S.B.. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meteorology 27:59-70.
17. JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J; PINTER Jr., P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research 17:1133-1138.
18. JARAMILLO, R. A. 1977. Comparación entre la evapotranspiración registrada en tanque y la calculada por diferentes fórmulas. Cenicafé 28(2):67-72.
19. ----- 1982. Balance hídrico de la zona cafetera colombiana. Cenicafé 33(1):15-34.
20. ----- 1999. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. Avances Técnicos Cenicafé No. 262. 4p.
21. ----- 2005. Clima andino y café en Colombia. Cenicafé. 192p.
22. ----- 2006. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. Cenicafé 57(4):288-298.
23. JARAMILLO, R. A.; CHAVES, C. B. 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. Cenicafé 50(2):97-105.

24. KUMAR, M.U.; VICTOR, U.S.; SRIVASTAVA, N.N.; SHARMA, K.L.; ARMES.V.; VANAJA, M.; KORWAR, G.R., y RAMAKRISHNA, Y.S. 2007. Estimating yield of sorghum using root zone water balance model and spectral characteristics of crop in dryland Alfisol. *Agricultural Water Management* 87(3):315-327.
25. MAVI, S.H.; TUPPER, J.G. 2004. *Agrometeorology: Principles and applications of climates studies in agriculture*. Food Products Press-Imprint of the Howorth Press, Inc 364p..New York.
26. PALMER, W.C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new Crop Moisture Index. *Weatherwise* 21:156-161.
27. RAMÍREZ B., V.H.; GÓMEZ M., O.F. 2005. Variaciones en el índice de humedad del suelo debido al fenómeno de El Niño y La Niña (ENSO) en del departamento de Risaralda (Colombia). *Investigaciones de Unisarc* 3(1):8-15.
28. RAMÍREZ, B. V. H.; JARAMILLO, R. A. 2007. Distribución de la lluvia en cuatro coberturas vegetales de la zona andina. *Investigaciones de Unisarc* 5(1):19-33.
29. RAMÍREZ B., V.H.; PORCH T.G.; HARMSEN, W.E. 2007. Evapotranspiration and water use efficiency for common bean genotypes under non-stress and drought stress conditions. *Proceedings of the Bean Improvement Cooperative Meeting, Madison, WI, Oct 29-31*.
30. RAMÍREZ, B. V. H.; MEJÍA, A.; MARÍN E., V.; ARANGO, R. 2010. Inconvenientes de los modelos de *Penman-Monteith* y de *Hargreaves* para la estimación de la evapotranspiración de referencia en la zona cafetera de Colombia. *Agronomía Colombiana*, en impresión. 16p.
31. RAMÍREZ, B. V. H.; GOYAL, M. R. Elementos de Agroclimatología. Universidad de Santa Rosa de Cabal-UNISARC (Colombia). 263p.
32. RAO, A.S.; SAXTON, K.E. Analysis of soil water and water stress for pearl millet in an Indian arid region using the SPAW model. *Journal Arid Enviromental*. 29:155-156. 1995.
33. SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FENENDES D.R. 1996. *Irrigação na culture do café*. Campinas: Arbore, 146 p.
34. SUÁREZ, V. S. 2000. Características físicas de los suelos de la zona cafetera colombiana relacionadas con el uso manejo y conservación. En: Simposio sobre suelos de la zona cafetera Colombiana. Julio 24-28. Cenicafé. 17p.
35. VELÁSQUEZ F., S.; JARAMILLO R., A. 2009. Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé* 60 (2):148-160.
36. VIÑA, A.; GITELSON, A.A.; RUNDQUIST, C.D.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B.; CHEPERS, J. 2004. Monitoring maize (*Zea mays* L) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal* 96:1139-1147.