

ANÁLISIS DE LA AGRESIVIDAD Y CONCENTRACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN VENEZUELA.

I. REGIÓN DE LOS LLANOS

Deyanira Lobo¹, Adriana Cortez², María F. Rodríguez², Francisco Ovalles²,
Juan C. Rey², Donald Gabriels³ y Raquel M. Parra¹

RESUMEN

La delimitación de áreas con diferente comportamiento de la precipitación puede ser la base para la planificación del uso y manejo sostenible de las tierras. Con el propósito de evaluar la agresividad y la concentración de la precipitación en la región de Los Llanos de Venezuela, se analizó la información de precipitación mensual de 96 estaciones a través del Índice de Fournier modificado (IFM) y el Índice de concentración de la precipitación (ICP). Los registros fueron objeto de análisis univariado y análisis geoestadístico. Para cartografiar la variable de precipitación se realizó una interpolación por el método kriging, cuyo resultado fue luego presentado en mapas utilizando la herramienta de ArcView. Se encontró que la zona central del área de estudio, constituida por la región centro-sur del estado Guárico, occidente de Anzoátegui y oriente de Apure y Barinas, presenta una alta concentración de las precipitaciones con muy alta agresividad, mientras que en el resto de la región se presenta una combinación de alta a muy alta agresividad y moderada estacionalidad de la precipitación.

Palabras clave adicionales: Geoestadística, índice de Fournier modificado, índice de concentración de la precipitación, manejo sostenible de tierras

ABSTRACT

Analysis of precipitation aggressiveness and concentration in Venezuela. I. The region of Los Llanos

The delineation of zones with different precipitations can be considered as basis for sustainable land use and management. With the objective to evaluate the aggressiveness and concentration of the precipitation in Los Llanos region of Venezuela, monthly precipitation data coming from 96 weather stations were analyzed by calculating the modified Fournier index (MFI) and the precipitation concentration index (PCI). The values were subjected to univariate and geostatistical analysis. For mapping the precipitation variable, kriging was used for interpolation and the results edited with ArcView. It was found that a zone with high precipitation concentration and aggressiveness exists in the center of the study area, including the central-south region of Guárico State, the West part of Anzoátegui State and the East part of the Apure and Barinas States, while in the rest of the area a combination of moderate seasonal precipitation with high to very high rain aggressiveness can be considered.

Additional key words: Geostatistics, modified Fournier Index, precipitation concentration index, sustainable land management

INTRODUCCIÓN

Las variaciones interanuales e intranuales de la precipitación (PP) tienen gran relevancia en estudios de degradación de tierras. Según Coles et al. (2003), las variaciones intranuales o estacionales pueden presentar en Venezuela dos patrones diferentes: de noviembre hasta febrero las lluvias son de origen frontal, causadas por frentes fríos, mientras que el resto del año están dadas por la formación de la zona de convergencia

intertropical (ZCIT) dando lugar a lluvias convectivas. A excepción de alguna franja costera con precipitaciones de origen frontal, casi todo el territorio nacional, incluyendo la región de Los Llanos, tiene lluvias de origen convectivo con distintas longitudes de período húmedo.

En zonas ecológicamente marginales, la variabilidad y distribución de la lluvia afecta severamente los cultivos de secano, mientras que la concentración de la misma puede ocasionar erosión hídrica, degradación de la tierra y

Recibido: Febrero 12, 2009

Aceptado: Junio 28, 2010

¹ Universidad Central de Venezuela. e-mail: lobod@agr.ucv.ve

² INIA-CENIAP. e-mail: mfrdriguez@inia.gob.ve; jcrey@inia.gob.ve; fovalles@inia.gob.ve

³ Universidad de Gante. Bélgica. e-mail: donald.gabriels@ugent.be

desertificación (Michiels y Gabriels, 1996; Jordán y Bellinfante, 2000). Lo anterior hace relevante la evaluación de la erosividad de la lluvia como uno de los factores relacionados con los riesgos de erosión hídrica.

La erosividad de la lluvia puede ser evaluada mediante el factor R propuesto por Wischmeier y Smith (1958), el cual es el producto de la energía cinética de las tormentas y su máxima intensidad en 30 minutos; el mismo ha funcionado bien en zonas templadas, por su alta relación con las pérdidas de suelo. Sin embargo, para las zonas tropicales, se han propuesto otros índices de erosividad, como el de Lal (1976), quien plantea la utilización de intervalos más cortos para la máxima intensidad, y el de Hudson (1986), quien propuso un índice que considera sólo la energía de las lluvias con intensidades mayores de 25,4 mm·h⁻¹. Por otra parte, el factor de erosividad R es difícil de obtener debido a que la energía cinética y la máxima intensidad de las tormentas individuales requieren ser analizadas de registros de lluvias de muchos años (Michiels y Gabriels, 1996), pero en muchos países, y particularmente en América Latina, no se dispone de estos registros, o existen redes meteorológicas de poca densidad de estaciones que están distribuidas irregularmente en regiones con alta variabilidad espacial y temporal de la agresividad de las lluvias. Estas limitaciones han llevado a relacionar la erosividad de la lluvia con otros parámetros que puedan ser determinados más fácilmente. Entre éstos están el Índice de Fournier (IF) modificado por Arnoldus (1980), en el que se consideran las lluvias de todos los meses del año y no sólo la del mes más húmedo, y el Índice de concentración de la precipitación (ICP), propuesto por Oliver (1980), el cual define los aspectos temporales de la precipitación y que puede ser más apropiado que otros índices estadísticos para evaluar y comparar la concentración de la lluvia entre estaciones.

El objetivo de este estudio fue evaluar la agresividad y concentración de la precipitación en la región de los Llanos de Venezuela mediante el Índice de Fournier modificado (IFM) y el Índice de concentración de la precipitación (ICP).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio correspondió a la región de los Llanos de Venezuela, constituida por los estados

Portuguesa, Cojedes, Barinas, Apure, Guárico, Anzoátegui y Monagas. Se dispuso de la información de precipitación mensual para el período 1970-2000 de las estaciones meteorológicas de las instituciones que manejan este tipo de información en el país como son el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Fuerza Aérea de Venezuela, Ministerio del Ambiente, Universidad Central de Venezuela y Electrificación del Caroní (EDELCA), ubicadas en la región de Los Llanos y sus alrededores. En total, se conformó un grupo de 96 estaciones. No se incluyeron registros posteriores al año 2000 debido a que algunas de estas estaciones dejaron de funcionar o presentaron muchos datos faltantes.

Se realizó un control de calidad de los registros utilizando los programas estadísticos de JMP 6 y e Infostat 1.1 para determinar la proporción de datos faltantes e identificar valores fuera de lo normal, lo que permitió una selección de las estaciones con la adecuada cantidad de información y valores dentro de rangos aceptables para garantizar resultados confiables. Para el análisis geoestadístico se empleó el programa Vesper 1.6 (Minasny et al., 2002), y el sistema de información geográfica ArcView 3.2 (ESRI, Redlands, CA) para realizar el control de la ubicación de las estaciones meteorológicas ingresando información del organismo responsable, nombre de la estación, estado, código, tipo, coordenadas geográficas y altitud. Una vez visualizada la ventana con los puntos y con la ayuda de la capa planimétrica se procedió a validar la ubicación de las estaciones (Figura 1).

Determinación de los índices de agresividad y concentración de la lluvia

Para evaluar la agresividad de la precipitación se utilizó el índice de Fournier modificado (IFM), definido por Arnoldus (1980) como:

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{\rho^2}{P}$$

donde ρ es la cantidad de lluvia mensual (mm) y P es la cantidad de lluvia anual (mm). Los resultados del IFM pueden ser clasificados según los valores mostrados en el Cuadro 1.

Para evaluar la concentración o aspecto temporal de la precipitación se utilizó el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP), definido por Oliver (1980) como:

$$ICP = 100 \frac{\sum \rho_i^2}{P^2}$$

donde ρ_i es la lluvia media mensual y P la lluvia media anual. Los resultados del ICP pueden ser clasificados según los valores mostrados en el Cuadro 2. Un valor bajo del ICP indica que la

lluvia tiene una distribución uniforme, mientras que valores más altos indican una mayor concentración de la precipitación. Así, los límites teóricos del ICP son 8,3 % cuando la lluvia de cada mes del año es la misma, y 100 % cuando toda la lluvia del año ocurre en un solo mes.

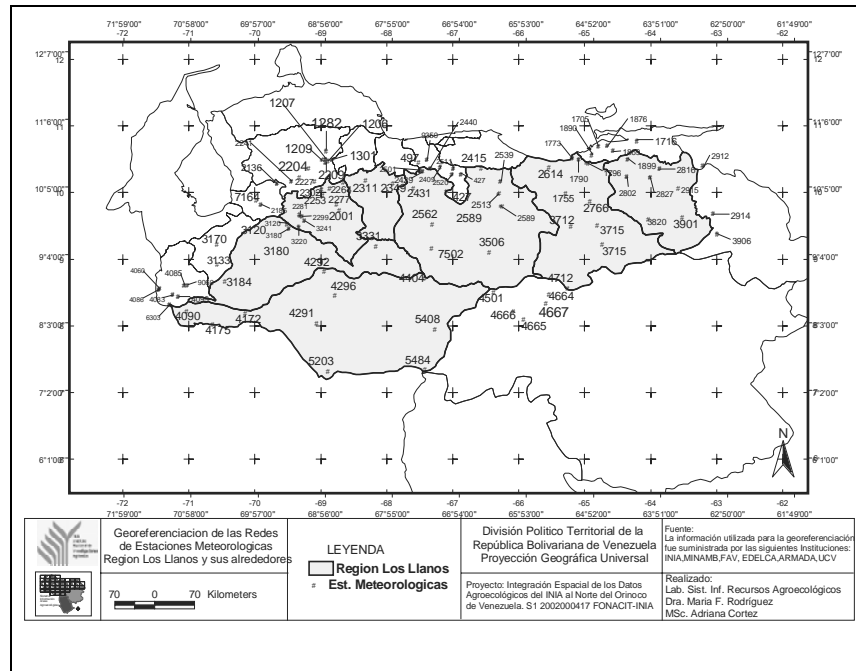


Figura 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas de la región de Los Llanos en Venezuela

Cuadro 1. Clasificación del Índice de Fournier Modificado (IFM)

IFM	Descripción
<60	Muy bajo
60 – 90	Bajo
90 – 120	Moderado
120 – 160	Alto
> 160	Muy alto

Cuadro 2. Clasificación del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP)

ICP (%)	Concentración estacional de la lluvia
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente estacional
16 – 20	Estacional
21 – 50	Fuertemente estacional
50 – 100	Irregular

Para la generación de los mapas de distribución de los índices en el sistema de información geográfica se realizaron los siguientes análisis y procedimientos:

- Análisis univariado: A partir de los datos de ICP e IFM se determinó la media, varianza, desviación estándar, coeficientes de variación, máximos y mínimos, asimetría y kurtosis, con la finalidad de establecer la estructura de los datos. Adicionalmente, se aplicó la metodología propuesta por Tukey (1977) para detectar valores atípicos que pudiesen afectar los análisis subsiguientes; dichos valores fueron eliminados para garantizar una mayor confiabilidad en los análisis de carácter espacial.
- Análisis geoestadístico: Se estableció el modelo de variación por medio de geoestadística (Webster y Oliver, 1990), el cual permitió definir la estructura espacial de propiedades y su estimación en sitios no muestreados, mediante la interpolación kriging.

Inicialmente, se calculó la semivarianza mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n [Z_{(x)} - Z_{(x+h)}]^2$$

donde γ = Semivarianza; N = número de pares de muestras separadas por un intervalo de distancia h; $Z_{(x)}$ = valor de la muestra en una ubicación x; $Z_{(x+h)}$ = valor de la muestra Z a una distancia h del sitio x.

A partir de la semivarianza se obtuvo el semivariograma experimental al graficar la semivarianza contra la distancia. El semivariograma experimental fue ajustado a modelos teóricos a partir de los cuales se obtuvo el alcance o rango de dependencia espacial, el umbral y la varianza aleatoria. Dado que la varianza aleatoria, la cual refleja la variabilidad existente a cortas distancias, depende de la escala de medida, se calculó la varianza aleatoria relativa o proporción con relación al umbral para expresar el grado de dependencia existente. Los resultados anteriores constituyeron los parámetros espaciales de los modelos de variación de los índices IFM e ICP.

Distribución espacial por el método de Kriging

Para el mapeo de las variables climáticas se

realizó una interpolación mediante la técnica del kriging puntual. Los estimados fueron calculados usando los parámetros de los semivariogramas ajustados, mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{Z}_{(x_0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(x_i)}$$

donde n = número de muestras vecinas a Z (x₀); λ = peso de ponderación aplicado a cada Z (x_i); $\hat{Z}_{(x_0)}$ = estimado de Z en x₀; Z (x_i) = muestra vecina a x₀.

Edición y generación de mapas de clasificación del ICP y del IFM

Una vez generado el archivo con las variables interpoladas, el mismo fue editado en ArcView GIS 3.2 para ser visualizado, analizado y clasificado, permitiendo examinar la variación espacial del ICP y del IFM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento espacial del promedio anual de la PP en la región de Los Llanos de Venezuela muestra una estación de lluvias muy marcada en el sur (estado Apure) y una sequía muy marcada en el norte de los estados Guárico y Anzoátegui (Figura 2).

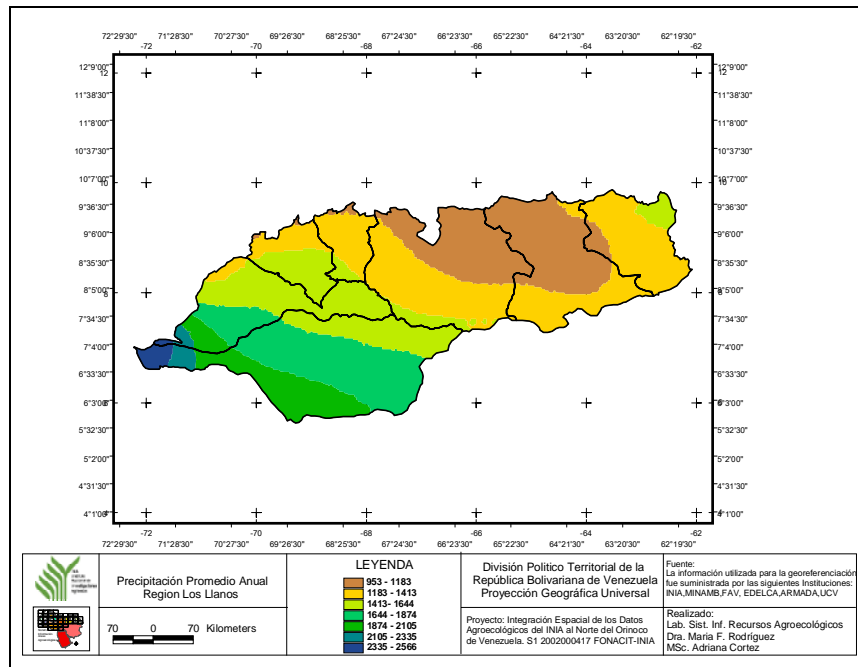


Figura 2. Distribución espacial de la precipitación media anual en Los Llanos de Venezuela

Esta distribución es similar a la mostrada por Marvez (2005), quien separa la región llanera de Venezuela en cuatro subregiones, que incluyen los llanos húmedos, ubicados al suroeste de la región y la parte occidental de los estados Apure y Barinas (PP anual = 1800-2400 mm), los llanos subhúmedos, en los estados Portuguesa, Barinas y Cojedes (PP anual = 1300-1800 mm), los llanos orientales secos a muy secos de los estados Anzoátegui, Monagas y Guárico oriental (PP anual = 700-1600 mm), y los llanos más secos en el centro-occidente del estado Guárico y el oriente de Cojedes (PP anual = 400-1300 mm).

El Cuadro 3 muestra los resultados del análisis univariado de los índices bajo estudio. Se observa que, en promedio, el IFM reveló una agresividad muy alta de las lluvias para la zona según los criterios establecidos en el Cuadro 1; sin embargo, el rango de variación es bastante amplio, encontrándose valores desde muy bajos (<60) hasta muy altos (>160), con un coeficiente de

variación que refleja una media a alta variabilidad espacial. Por su parte, el ICP presentó una condición de moderadamente estacional según los criterios establecidos en el Cuadro 2, y aun cuando el coeficiente de variación es bajo, el rango de la variable (valores entre mínimo y máximo) refleja una característica de moderadamente estacional a estacional. Los valores de asimetría y kurtosis de ambos índices estuvieron cercanos a 0, indicando una distribución de los datos cercana a la normal. En general, estos resultados afianzan la importancia de conocer el comportamiento en el espacio de estas variables climáticas.

Los semivariogramas del IFM e ICP presentaron un comportamiento transicional, es decir, se tuvo un incremento de la semivarianza con la distancia hasta estabilizarse, indicando la presencia de dependencia espacial (Figura 3). Al ajustarlos a modelos teóricos se obtuvieron los parámetros del modelo de variación mostrados en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Análisis univariado del IFM y el ICP para los Llanos de Venezuela

Variable	n	Media	SD	Var	CV (%)	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis
IFM	96	194,55	78,71	6196,02	40,46	52,65	450,79	0,72	0,91
ICP	96	14,4	1,82	3,33	12,67	11,06	18,62	0,16	-0,82

IFM: Índice de Fournier Modificado; ICP: Índice de la Concentración de la Precipitación; n: Número de estaciones; SD: Desviación estándar; Var: Varianza; CV: Coeficiente de variación

Cuadro 4. Parámetros de los modelos de variación para el IFM e ICP en los Llanos de Venezuela

Variable	Modelo	Alcance (°)	Co	Co+C	Co relativa (%)
IFM	Esférico	4,28	1974,1	6781,1	29,1
ICP	Gaussiano	3,06	0,6	5,1	11,7

IFM: Índice de Fournier modificado; ICP: Índice de Concentración de la precipitación; Co: Varianza aleatoria; Co+C: Umbral; Co relativa = $100 * Co / (Co + C)$

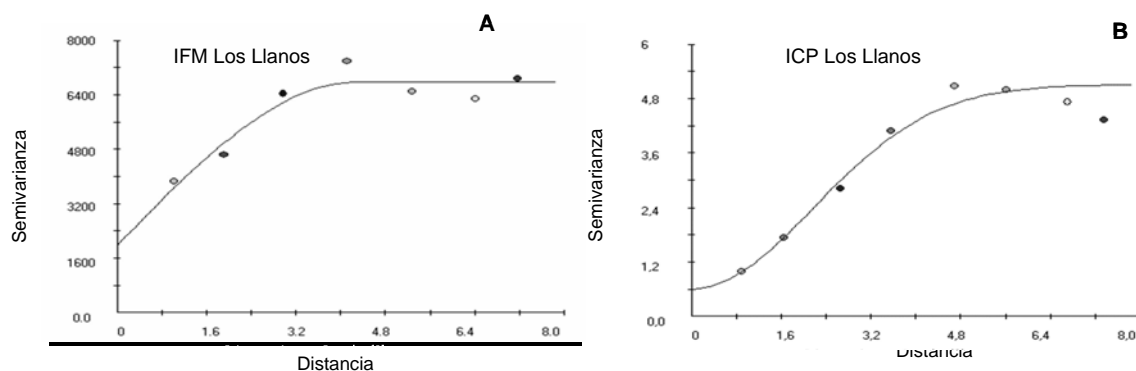


Figura 3. Semivariogramas experimental y teórico del IFM (A) e ICP (B) de los Llanos de Venezuela

Las variables presentaron alcances bastante cercanos entre sí (3,06° y 4,28°), reflejando que existe una dependencia espacial, es decir, las propiedades presentan valores con mayor similitud a medida que se encuentran más cercanas entre sí. Por otra parte, el umbral, o sea el indicador de la variabilidad total, mostró que para el IFM el valor resultó similar al de la varianza del análisis univariado, mientras que el umbral del ICP fue inferior a ésta, indicando que los datos son estacionarios, es decir, que la variación de las propiedades en el espacio depende de la distancia entre las observaciones, más que de su ubicación específica. Esta estacionaridad genera más confianza en los resultados de la interpolación kriging.

El IFM presentó una varianza aleatoria media (25-75 %) de acuerdo con los criterios de

Cambardella et al. (1994), indicando un moderada dependencia espacial, mientras que la varianza aleatoria del ICP fue baja (<25 %), reflejando una fuerte dependencia espacial. Esto indica que el IFM presenta una alta variabilidad a cortas distancias, mientras que para el ICP la variación a cortas distancias es baja. Al analizar los resultados de la interpolación se observa que para el caso del IFM (Figura 4) los valores de las estimaciones corresponden a las clases alta y muy alta (Cuadro 1). La mayor agresividad de la lluvia se presenta al suroeste de Guárico y en los estados Cojedes, Portuguesa, Barinas y Apure, mientras que la menor agresividad corresponde al estado Monagas, centro-norte del estado Anzoátegui y noreste de Guárico. El patrón de distribución espacial muestra una gradación de menor a mayor IFM que va en sentido noreste a suroeste de la zona de estudio.

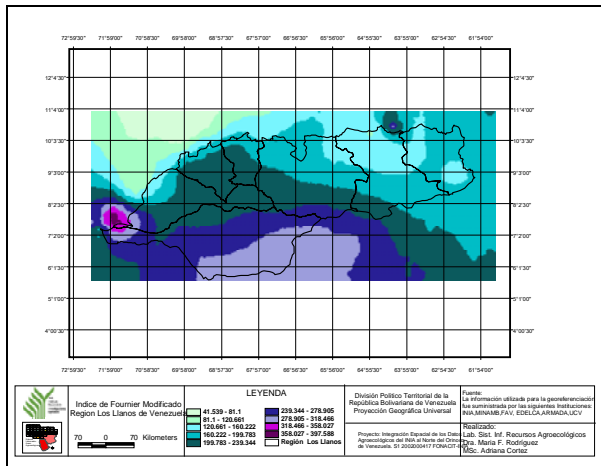


Figura 4. Interpolaciones del IFM en los Llanos de Venezuela

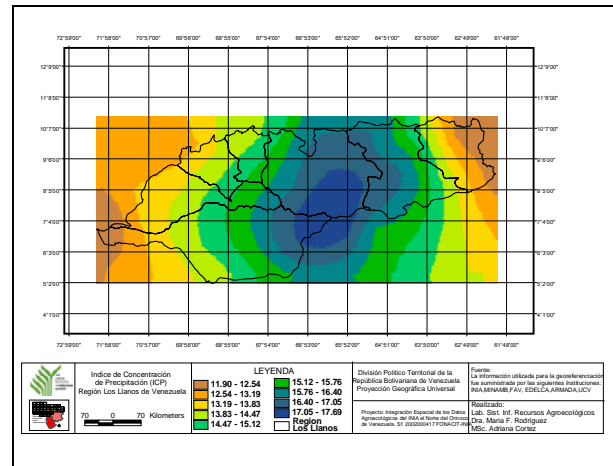


Figura 5. Interpolaciones del ICP en los Llanos de Venezuela

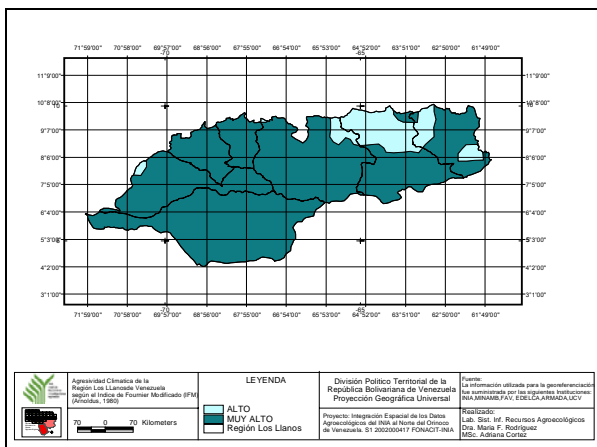


Figura 6. Distribución espacial de las clases del Índice de Fournier Modificado (IFM)

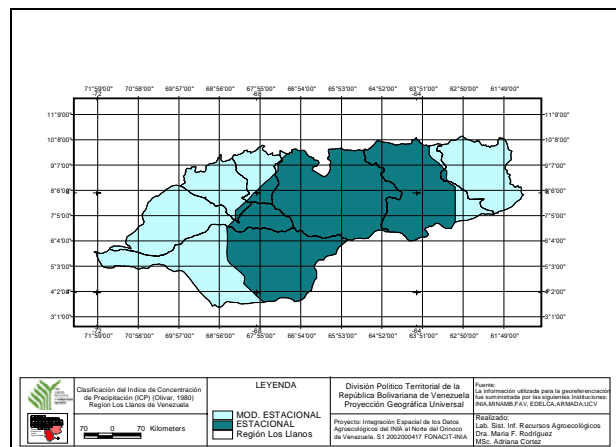


Figura 7. Distribución espacial de las clases del Índice de Concentración de la Precipitación (ICP)

En el caso del ICP los mayores valores se encuentran ubicados principalmente en centro-orientado del estado Guárico, occidente de Anzoátegui y orientado de Apure, donde los valores del ICP son predominantemente mayores de 16 % (Figura 5), lo que indica la concentración de las precipitaciones, es decir la estacionalidad de las mismas (Cuadro 2). En el resto de la zona de estudio, el ICP está entre 11 y 15 % indicando una condición moderadamente estacional. No obstante, dentro de las dos clases de concentración se observa una gradación de ambas; este patrón espacial indica que la estacionalidad es mayor hacia el centro de la zona de estudio, específicamente al sureste del estado Guárico, disminuyendo progresivamente hacia los extremos orientado y occidental. La distribución espacial de las clases del IFM (Figura 6) e ICP (Figura 7) indica que la zona central del área de estudio, constituida por la región centro-sur del estado Guárico, el occidente del estado Anzoátegui y el orientado de los estados Apure y Barinas, presenta unas precipitaciones concentradas con una agresividad muy alta, mientras que el resto de la región presenta una combinación de alta a muy alta agresividad y moderada estacionalidad. Estas condiciones crean una alta vulnerabilidad en la zona; por ello el uso de la tierra, sobre todo bajo condiciones de secano, debe considerar la implementación de sistemas de producción adaptados a las condiciones de concentración de las lluvias y, por otra parte, los sistemas de manejo deben considerar prácticas conservacionistas que atenúen el efecto de la alta a muy alta agresividad de la precipitación. De otra forma, el riesgo de degradación del suelo sería alto debido a que el mismo presenta alta susceptibilidad a la erosión hídrica (Lozano et al., 2002), y al hecho de que más del 50 % de las precipitaciones que allí ocurren son calificadas como erosivas (Lobo, 2004).

Es de destacar que en la zona central de Los Llanos la productividad de los suelos disminuye como consecuencia de la erosión hídrica, debido especialmente a los cambios que se producen en la capacidad de almacenamiento de agua, densidad aparente y pH. Este riesgo de erosión está fuertemente influenciado por el gradiente de pendiente y la agresividad de las lluvias, lo cual sugiere altos requerimientos de conservación de

los suelos (Lobo et al., 2005). Asimismo, los riesgos de erosión hídrica en la región orientado son altos debido al uso de cultivos menos protectores del suelo como maní, sorgo y yuca, por lo cual tienen alta exigencia de manejo conservacionista (Ferrer y Comerma, 1997).

CONCLUSIONES

La agresividad de la precipitación es muy alta en la región de Los Llanos de Venezuela, con una fluctuación de muy baja a muy alta, mientras que la concentración de las lluvias es moderadamente estacional con una fluctuación hacia estacional.

Se detectó dependencia espacial entre el IFM y el ICP, mostrando un carácter transicional y estacionaridad de los datos. Esta dependencia fue moderada en el IFM y alta en el ICP.

Se encontró una gradación casi concéntrica de los valores del ICP, presentándose la mayor estacionalidad de las precipitaciones hacia el centro de la zona de estudio, específicamente al sureste del estado Guárico, disminuyendo progresivamente hacia los extremos orientado y occidental.

El IFM mostró la menor agresividad al centro-norte del estado Anzoátegui, noreste de Guárico y noroeste de Monagas, con una gradación en sentido noreste a suroeste de la zona.

La combinación de los mapas del ICP y del IFM indican que la zona central del área de estudio, constituida por la región centro-sur del estado Guárico, occidente del estado Anzoátegui y orientado de los estados Apure y Barinas, presenta unas precipitaciones concentradas con una agresividad muy alta, mientras que el resto de la región presenta una combinación de moderada estacionalidad y alta a muy alta agresividad. Estas condiciones crean una alta vulnerabilidad en la zona, por lo que el uso de la tierra bajo condiciones de secano debe basarse en sistemas de producción adaptados a prácticas conservacionistas.

LITERATURA CITADA

1. Arnoldus, H.M. 1980. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. *In: De Boodt y Gabriels (eds.). Assessment of Erosion.* Wiley. New York. pp. 127-132.
2. Cambardella, C., T. Moorman, J. Novak, T. Parkin, D. Karlen, R. Turco y E. Konopka.

1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1501-1511.
3. Coles, S., L. Pericchi y S. Sisson. 2003. A full probabilistic approach to extreme rainfall modeling. *Journal of Hydrology* 273: 35-50.
4. Ferrer, J. y J. Comerma. 1997. Riesgos de erosión hídrica bajo el uso actual de la tierra en las mesas orientales de Venezuela. *Venesuelos* 5(1 y 2): 2-8.
5. Hudson, N.W. 1986. *Soil Conservation*. Batsford. London.
6. Jordán A. y N. Bellinfante. 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología* 7: 83-92.
7. Lal, R. 1976. Soil erosion in Alfisols in Western Nigeria. III. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma* 16: 389-401.
8. Lobo, D. 2004. Soil physical properties affecting soil erosion in tropical soils. *In: Gabriels et al. (eds.). Invited Presentations College on Soil Physics. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP). Trieste, Italy. Vol. 18. pp. 221-243.*
9. Lobo, D., Z. Lozano y F. Delgado. 2005. Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil. *Catena* 64: 297-306.
10. Lozano, Z., D. Lobo e I. Pla S. 2002. Susceptibilidad a la degradación física de Alfisoles de los llanos centrales y occidentales de Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 28: 41-57.
11. Marvez, P. 2005. Rasgos climáticos de los Llanos de Venezuela. *In: Hettier y López (eds.). Tierras Llaneras de Venezuela, IRD-CIDIAT-UNELLEZ. Editorial Venezolana. Mérida. Venezuela. pp. 49-56.*
12. Michiels, P. y D. Gabriels. 1996. Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean Region. *In: Rubio y Calvo (eds.). Soil Degradation and Desertification in Mediterranean Environments. Centro de Investigaciones sobre Desertificación. Universidad de Valencia y Generalitat Valenciana. Geofoma. Logroño. España. pp. 49-70.*
13. Minasny, B., A.B. McBratney y B.M. Whelan. 2002. VESPER versión 1.6. Australian Centre for Precision Agriculture. The University of Sidney. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa> (consulta del 24/10/09).
14. Oliver, J.E. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer* 32: 300-309.
15. Webster, R. y M.A. Oliver. 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press. New York.
16. Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions American Geophysical Union* 39(2): 285-291.