



Lógica difusa: Una alternativa metodológica en la determinación de ambientes idóneos para el establecimiento de especies de pastos y forrajes en Colombia (Primera Aproximación)

Fuzzy Logic: An alternative methodology to select optimal environments for grass and forage grass species in Colombia (First approach)

Andrés J Peña Q.¹, Luis F. Palacio R², Blanca A Arce B³.

¹Investigador Master Asistente, Red de cambio climático y agricultura, Corpoica – Tibaitatá; ² Investigador Asociado, Unidad de geomática, Corpoica – Tibaitatá; ³ Investigadora Ph.D., Red de pastos y forrajes, Corpoica – Tibaitatá

ajpenaq@gmail.com

Recibido: 30 junio de 2010; Aceptado 3 de agosto de 2010

Resumen

Los productores agropecuarios, sobre todo aquellos que se dedican a la siembra de especies perennes, como es el caso de los ganaderos, pierden dinero porque determinan las especies de cultivo con base en ensayo y error. Se revisó una metodología para implementar un sistema que mejore la forma en que los ganaderos tomen la decisión y determinen las especies a sembrar en un área dada. La metodología basada en lógica difusa ofrece ventajas ante los sistemas de toma de decisión actual; una de ellas radica en que el criterio de los expertos en pastos y forrajes, suelos y clima, se puede sistematizar y convertir en una herramienta objetiva.

Palabras clave: forraje, modelación, probabilidad, sistema, brachiaria

Abstract

Farmers, and mainly those who are dedicated to the sowing of perennial species, as is the case of livestock producers, lose money because they choose their crop species based on trial and error. A methodology was revised to develop a system that improves the decision about what the best pasture or crop for a certain area is. The methodology based on fuzzy logic offers advantages in relation to current decision systems; for example, with fuzzy logic, the opinion of experts on grass and forage grass, soil and climate can be systematized and become an objective tool to choose any crop.

Keywords: forage, modelation, probabilities, system, Brachiaria

Introducción

En agricultura se puede llamar condición estresante a aquella que reduce la tasa de algún proceso fisiológico de la planta por debajo de la tasa máxima que ésta mantendría en otras condiciones más favorables, es decir, por debajo del potencial de su genotipo o de su óptimo (Osmond et al, 1987; Lambers et al, 1998). Son varios los factores ambientales (bióticos y abióticos) que pueden reducir la vitalidad de las plantas e incluso, dañarlas y causarles la muerte (Reigosa et al, 2003). Esto quiere decir que hay ambientes capaces de desestabilizar las funciones normales de las plantas cuando estas no están aclimatadas o adaptadas. El presente trabajo tiene como eje temático la Agricultura de Precisión, especialmente, lo que CIAT (2003) ha llamado Desarrollo Específico por Sitio, el cual se basa en el estudio de la variabilidad espacial de las condiciones edafo-climáticas (factores abióticos) de una región y la aplicación de éste a la determinación de las mejores opciones agrícolas para una localidad a través del conocimiento de los ambientes en los que los materiales genéticos conservan su vitalidad y la tasa normal de sus procesos fisiológicos (adaptados y/o aclimatados), que les permite crecer con pocas restricciones y mantener unos rendimientos estables.

Los Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones (STD) para determinar regiones idóneas para el crecimiento de cultivos, existentes en la actualidad, parten de la definición a priori de una especie, por lo que de entrada se reducen las opciones; es decir, se define un cultivo objetivo y se delimitan las zonas en las cuales su crecimiento es posible, en mayor o menor grado, como sucede con el módulo EcoCrop disponible en DIVA-GIS (Hijmans et al, 2004). Por su parte, EcoCrop (FAO, 2009) permite definir varias especies para un mismo ambiente; sin embargo la decisión se toma con base en unos umbrales ambientales fijos de tal manera que si, por ejemplo, las condiciones óptimas de un cultivo están entre 23 y 28 °C y el ambiente ofrece 28.5 °C, este ambiente será considerado subóptimo, lo cual puede confundir al tomador de decisiones.

Para mejorar la forma en que se toma la decisión, se plantea una metodología en la que los umbrales de las variables de entrada al STD son difusos o borrosos, por lo que es necesario analizarlos mediante técnicas de lógica difusa. La lógica difusa o borrosa utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total. Conviene recalcar que lo que es difuso, borroso, impreciso o vago no es la lógica en sí, sino el objeto que estudia: expresa la falta de definición del concepto al que se aplica. La lógica difusa permite tratar información imprecisa

como precipitación media o fertilidad baja, en términos de conjuntos borrosos que se combinan en reglas para definir acciones (Pérez Pueyo, 2005).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema que sirva de apoyo a la toma de decisión para que los ganaderos respondan preguntas, tales como “¿Puedo cultivar esta especie aquí?” o “¿Qué crecería bien aquí?”; preguntas que generalmente quedan sin responder (CIAT, 2003). Se priorizó la ganadería porque, con 38 millones de hectáreas, es el mayor uso de la tierra en Colombia; además, porque en algunas zonas del país, por ejemplo en las zonas altoandinas, la baja diversidad de especies forrajeras (Mila y Corredor, 2004) puede atentar contra el bienestar de los productores de esas zonas, por lo vulnerables que pueden ser los sistemas de monocultivo generalizados en regiones amplias (Gliessman, 2007), por lo que es urgente una metodología para que los productores puedan diversificar pastos y forrajes sin tener que incurrir en ensayos prueba-error, que son muy costosos.

Materiales y métodos

La lógica difusa permite abordar los problemas desde el conocimiento subjetivo, el cual está representado por la información lingüística, la cual usualmente es imposible de cuantificar utilizando las matemáticas tradicionales (Mendel, 1995). Según Portilla (2001), se puede definir un sistema de lógica difusa (SLD) como un algoritmo que toma información de entrada, la procesa a través del motor de inferencia siguiendo las reglas creadas según la heurística y da resultados numéricos concretos como producto para el análisis en el proceso de toma de decisiones. Los datos de entrada y de salida, son datos concretos, aunque dentro de la estructura del SLD, están representados por medio de una variable lingüística. El conjunto de las variables de entrada, se denomina universo de entrada y al conjunto de las variables lingüísticas de salida, se conoce como universo de salida. Un SLD está constituido por cuatro módulos:

Módulo difusor: toma el valor concreto de entrada y halla el grado de pertenencia a cada uno de los términos lingüísticos (Figura 1). En este caso, se consideran bajas las precipitaciones anuales inferiores a 1350 mm, se consideran medias aquellas que están entre 600 y 2100 mm y altas aquellas que sobrepasan los 1350 mm por año. Por ejemplo, una precipitación de 1200 mm anuales es baja y media al mismo tiempo, lo cual no puede ser en la lógica tradicional.

Módulo base de reglas: que es un conjunto de proposiciones lógicas generadas a partir de la experiencia o

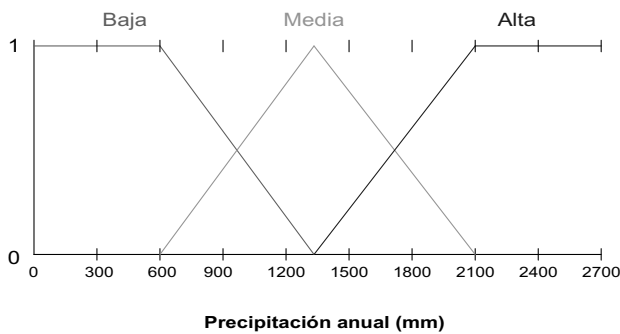


Figura 1. Significador Lingüístico de la variable precipitación (Sánchez, 2009).

de la abstracción del análisis de datos numéricos (Tabla 1). Este módulo es el que definen los expertos o conocedores del tema; en este caso Sánchez (2009) definió una base de reglas para determinar el éxito de una especie con base en la descripción lingüística, casi cualitativa, de cuatro variables edáficas y climáticas.

Modulo motor de inferencia: que de acuerdo con los términos lingüísticos determinados en el modulo difusor, toma la base de reglas y define cuales de ellas se deben tener en cuenta según lo enunciado por el antecedente; luego, procesa este enunciado de acuerdo a la implicación predeterminada como parámetro de diseño del SLD, dando un conjunto difuso resultante y, por último, lo opera con el respectivo término lingüístico del universo de discurso de la variable de salida, generando un corte o conjunto difuso de salida.

Modulo concesor: que recibe los conjuntos difusos de salida o cortes producidos por el motor de inferencia, los procesa y mediante un algoritmo produce un valor concreto de salida, que es la salida final del SLD.

Diseño del SLD

Variables de entrada: Con base en la consulta de expertos se definió el número mínimo de variables ambientales (suelo y clima) para definir áreas de siembra de diferentes especies de pastos y forrajes. Estas variables fueron altura sobre el nivel del mar (ASNM) en metros,

humedad ambiental (Humedad), definida como el número de meses lluviosos en el año, drenaje natural (Drenaje), caracterizado como un valor entre 1 y 6, adjudicado con base en las características encontradas al momento del levantamiento de suelos y el potencial de Hidrogeniones dentro del suelo (pH). Se definieron los rangos de evaluación y los limites de los mismos (Figura 2). A la ASNM y al pH, por ser variables críticas en términos de adaptación de las plantas a los ambientes, se les adjudico un mayor número de rangos (4) en comparación con Humedad y Drenaje que sólo tienen 3 (Figura 2).

Variable de salida: La combinación de estas cuatro variables ofrece un espectro de 144 ambientes posibles (4x3x4x3), que en la práctica se transformaron en 48 con unas especies asociadas a cada uno de ellos.

Base de reglas: La base de reglas, que relaciona las variables de entrada con las de salida se implementó en el software UNFUZZY 1.2 (Duarte, 2001), que permite el diseño de SLD. Básicamente, la base de reglas esta constituida por proposiciones, tales como, baja ASNM, baja Humedad, bajo pH y pobre Drenaje es igual a Sesbania Formosa, ó alta ASNM, alta Humedad, alto pH y buen Drenaje es igual a Morus alba. En algunos casos la salida estuvo compuesta por más de una variable, por ejemplo: ASNM media baja, Humedad alta, pH medio alto y Drenaje moderado es igual a Dichanthium caricosum, Stenotaphrum secundatum y Echinochloa polystachya.

Implementación del SLD en plataforma SIG

Se interpoló la información de pH y Drenaje, disponible en los perfiles modales de los estudios de suelo realizados a nivel nacional por el IGAC; la superficie de datos de Humedad fue construida con base en Worldclim (Hijmans et al., 2005); mientras que el dato de ASNM se tomó de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Estas capas de información fueron superpuestas y se corrió en ArcGIS un modelo de tipo If – Then, con base en la salida del SLD construido en UNFUZZY 1.2 (Tabla 2).

Tabla 1. Módulo base de reglas (Sánchez, 2009)

Tº Media	precipitación	pH	% Arcilla	Probabilidad de éxito
baja	Baja	Baja	baja	bajo
baja	Baja	Baja	media	medio
baja	Baja	Baja	alta	bajo
baja	Baja	Media	baja	bajo
baja	Baja	Media	media	alto
baja	Baja	Media	alta	medio

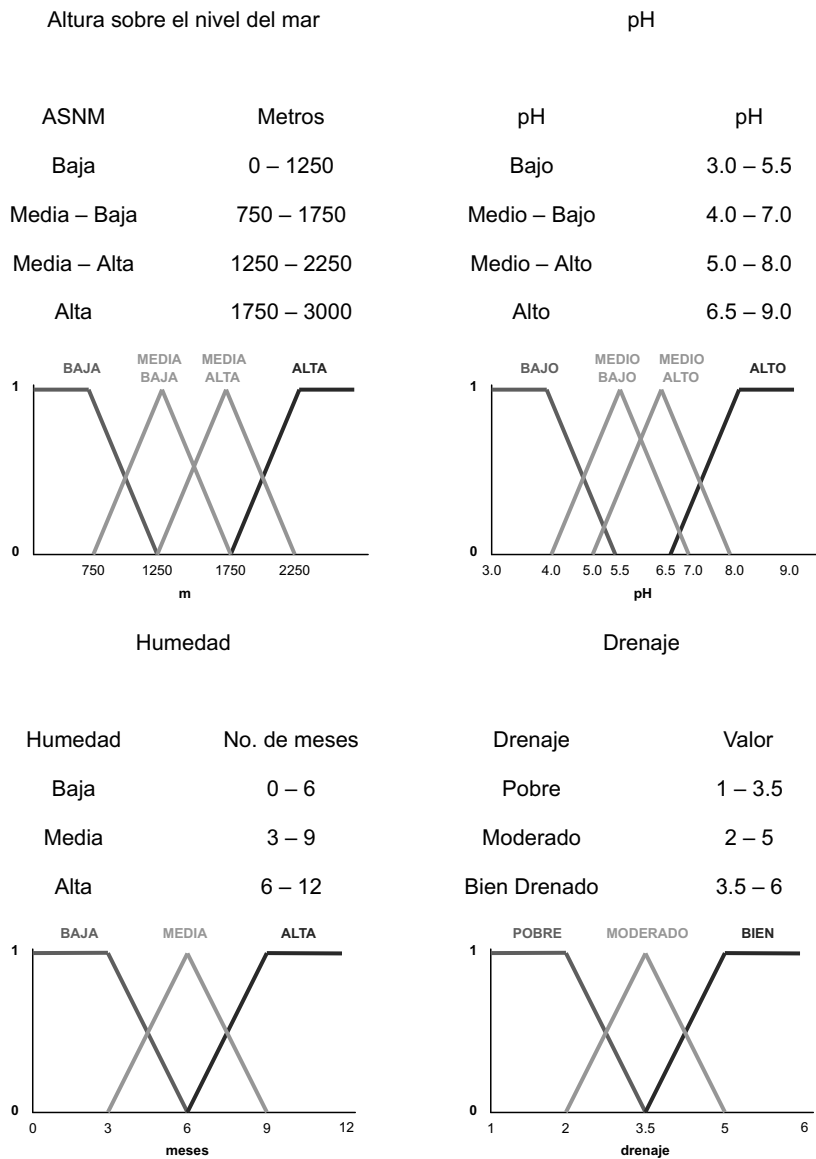


Figura 2. Variables de entrada al SLD y significadores lingüísticos utilizados en cada una de ellas.

Resultados preliminares

En la Figura 3 se observa la salida final para un municipio con diversos ambientes, como es Villavicencio (Meta, Colombia). Se ve claramente la diversidad de especies forrajeras que podrían ser cultivadas en este municipio. Cada color corresponde a un grupo de especies que podrían crecer bien en esos ambientes. La gran diferencia de este sistema de toma de decisiones, con respecto a otros, es que éste no plantea, a priori, algún tipo de especie; es el sistema el que la sugiere con respecto a los ambientes evaluados. Esto representa una gran diferencia con respecto a lo que se observa en la Figura 4, donde aparecen las áreas idóneas para el cultivo de *Brachiaria decumbens*, en la que se le pide

al sistema que determine la idoneidad de la especie en un área. Plantear a priori la especie conlleva a que el agricultor termine sembrando siempre el mismo cultivo (pastura).

El sistema propuesto tiene varias ventajas frente a los otros sistemas de toma de decisiones, como por ejemplo que permite su uso a varias escalas: a nivel predial, para manejo específico por sitio; a nivel de lote o finca; a nivel regional e incluso a nivel tropical, siempre y cuando se tengan las bases de datos para hacerlo. De otro lado, el sistema involucra información mínima, definida por los expertos como el conocimiento mínimo necesario para determinar la idoneidad de una especie en un ambiente, lo cual lo hace fácilmente adaptable, incluso para zonas en las que no se dispone de datos de suelo y clima.

Tabla 2. Parte de la salida del SLD; esto significa que a 0 msnm, con 0 meses húmedos, drenaje pobre y pH ácido (3-3.9), la especie recomendada sería *Sesbania formosa*; mientras que cuando sólo cambia el pH y tenemos suelos alcalinos (que puede ser lo más cercano a la realidad), las especies indicadas serían *Sesbania sesban* y *Panicum coloratum*

ASNM	HUM	DREN	pH	Amb	Especie
0	0	1	3	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	1	4	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	1	5	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	1	6	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	1	7	2	<i>Sesbania sesban</i> ; <i>Panicum coloratum</i>
0	0	1	8	2	<i>Sesbania sesban</i> ; <i>Panicum coloratum</i>
0	0	1	9	2	<i>Sesbania sesban</i> ; <i>Panicum coloratum</i>
0	0	2	3	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	2	4	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	2	5	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	2	6	1	<i>Sesbania formosa</i>
0	0	2	7	2	<i>Sesbania sesban</i> ; <i>Panicum coloratum</i>
0	0	2	8	2	<i>Sesbania sesban</i> ; <i>Panicum coloratum</i>
0	0	2	9	2	<i>Sesbania sesban</i> ; <i>Panicum coloratum</i>

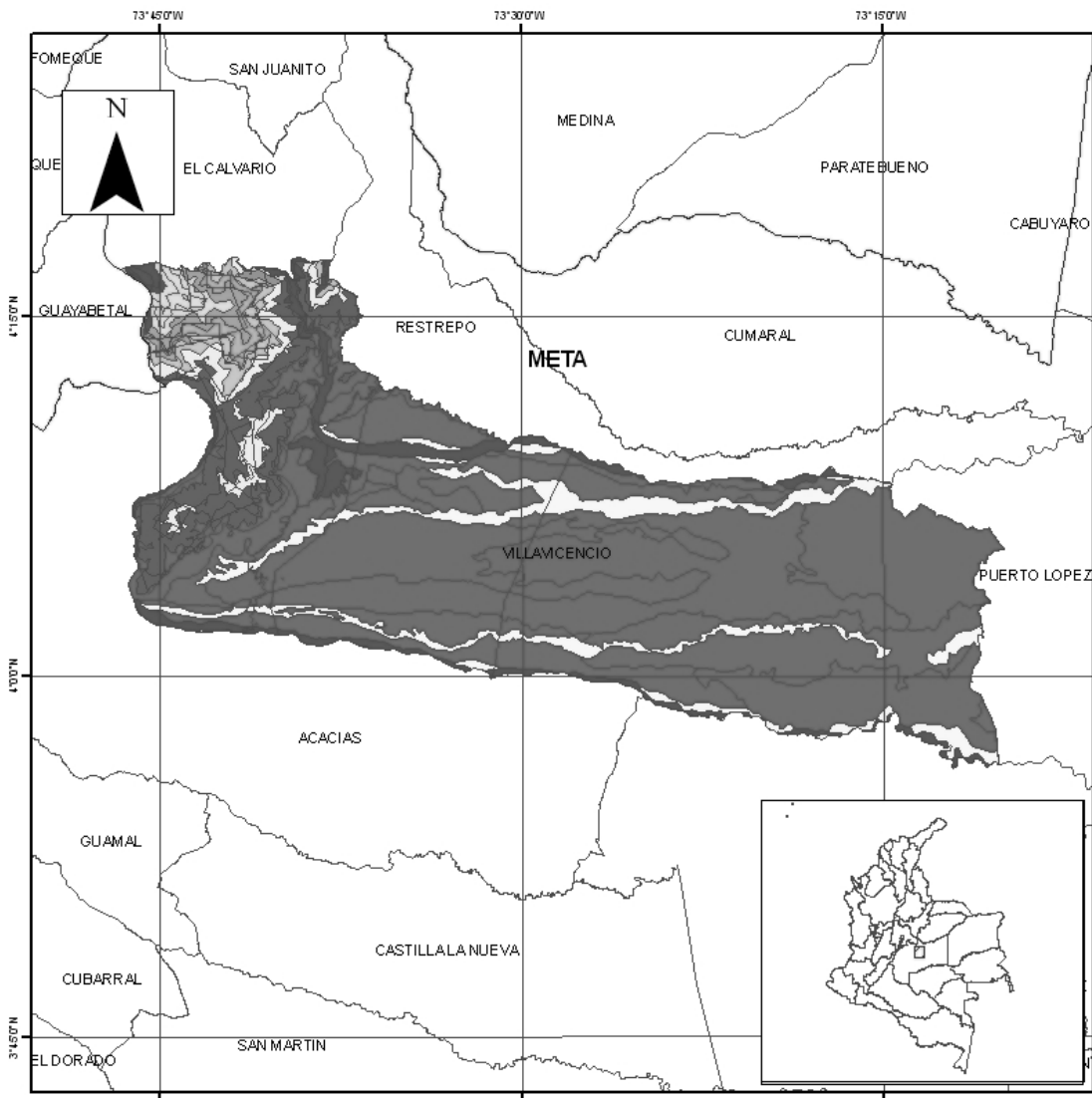


Figura 3. Ejemplo de la espacialización del SLD para el municipio de Villavicencio en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

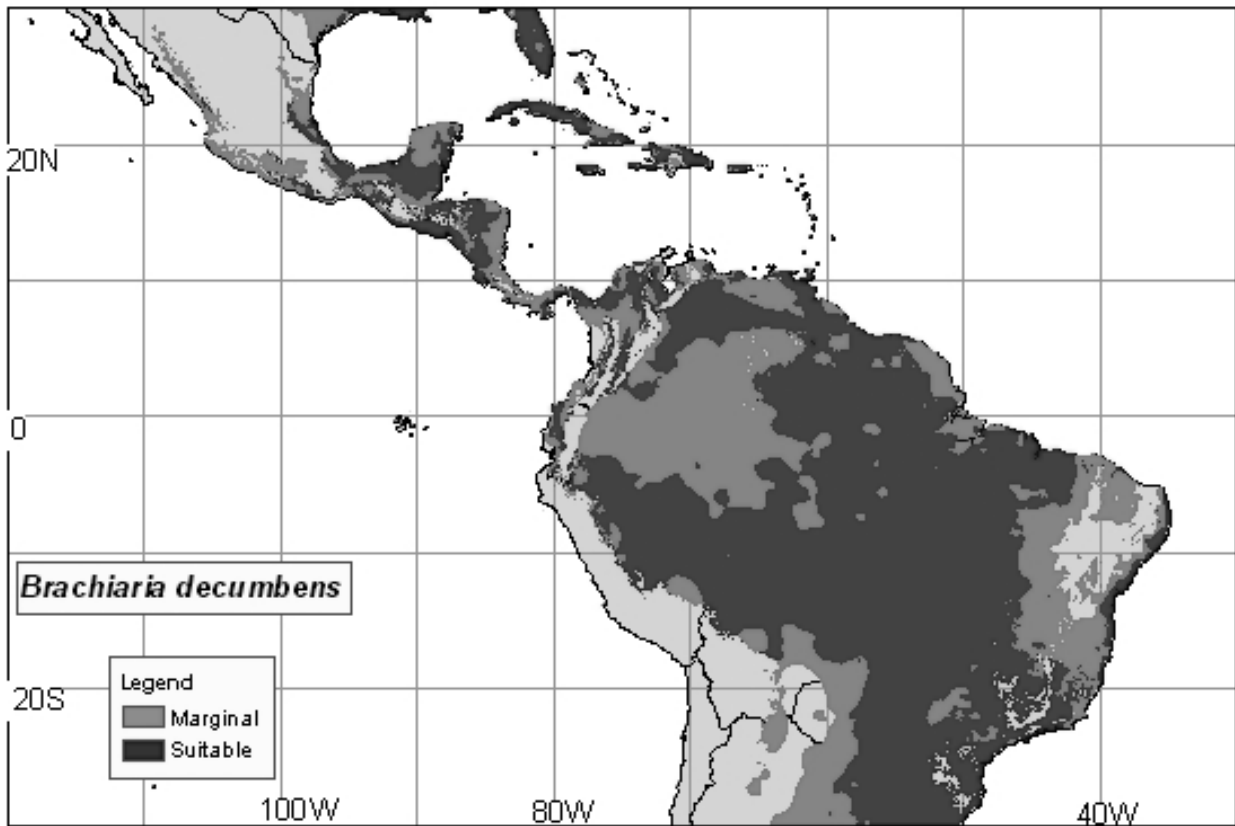


Figura 4. Ejemplo de la salida de un sistema de toma de decisiones convencional (Cook et al., 2005) en el que se le pide al sistema que muestre las áreas idóneas para *B. decumbens*.

La gran variedad de colores en la Figura 3 indica la cantidad de posibilidades de especies de pastos y forrajes a sembrar. Obsérvese que la salida de la Figura 4 indica en que sitios es posible sembrar *B. decumbens* y en cuales no; mientras que en con el SLD propuesto la salida es la especie, o grupo de especies como tal, lo cual proporciona una ventaja y es que el agricultor tiene alternativas.

Conclusiones y recomendaciones

A diferencia de otros sistemas que utilizan información climática o información edáfica, este STD utiliza la información tanto de suelos como de clima para determinar

la especie idónea en cualquier ambiente. Otra ventaja es que no define a priori una especie para determinar su nivel de adaptación a un ambiente; la salida son una serie de especies y el productor decide cual es la que le conviene a partir de criterios relacionados con el aporte nutritivo o proteico a la dieta de los animales.

Es de anotar que los resultados mostrados son producto de una etapa inicial dentro de un gran proyecto de zonificación y definición de sistemas expertos para la ganadería colombiana, que se adelanta en Corpoica, razón por la cual todavía es necesario realizar la validación de las salidas obtenidas. Por este mismo motivo, los autores se abstienen de mostrar las salidas específicas obtenidas para el municipio de Villavicencio.

Referencias

- CIAT. Conocimiento Local – Desarrollo por sitio específico. 2003. <http://gisweb.ciat.cgiar.org/Sig/esp/conocimiento-local.htm>
- Cook, B.G., Pengelly, B.C., Brown, S.D., Donnelly, J.L., Eagles, D.A., Franco, M.A., Hanson, J., Mullen, B.F., Partridge, I.J., Peters, M. and Schultze-Kraft, R. Tropical Forages: an interactive selection tool., [CD-ROM], CSIRO, DPI&F(Qld), CIAT and ILRI, Brisbane, Australia. 2005.
- Duarte, O. UNFUZZY - Software para el Diseño, Análisis, Simulación e Implementación de Sistemas de Lógica Difusa. Tesis de Magister. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. 2001.
- FAO. Ecocrop. 2009. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>
- Gliessman, S. Agroecology: the ecology of sustainable food systems. CRC Press. 2007.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978. 2005.
- Hijmans, R.J., Guarino, L., Bussink, C., Mathur, P., Cruz, M., Barrantes, I., Rojas, E. DIVA-GIS: Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Datos de Distribución de Especies – Manual. 2004. Disponible en: http://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS4_manual_Esp.pdf
- Lambers, H., Chapin, F., Pons, T. *Plant physiological Ecology*. Springer Verlag, New York, 538 p. 1998.
- Mendel, J. 1995. Fuzzy Logic Systems for engineering: A Tutorial – proceeding of the IEEE, v 83, 3, New York. pp 345 – 377
- Mila, A., Corredor, G. Evolución de la composición botánica de una pradera de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) recuperada mediante escarificación mecánica y fertilización con composta. *Revista Corpoica* 5 (1): 70-75. 2004.
- Osmond, C., Austin, M., Berry, J., Billing, W., Boyer, J., Nobel, P., Smith, S., Winner, W. Stress physiology and the distribution of plants. *Bioscience* 37: 38-49. 1987.
- Perez Pueyo, R. Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: aplicación a la identificación de materiales pictóricos. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 2005
- Portilla, M. Aplicación de los sistemas de lógica difusa en la evaluación de la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. *Revista Geología Colombiana*, 26, p 189-205. 2001.
- Reigosa, M., Pedrol, N., Sanchez, A. 2003. La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis. Thomson, Madrid, pp 1-15.
- Sánchez, L. Sistema de toma de decisiones basado en lógica difusa, para determinar ambientes idóneos para especies promisorias en Aipe (Huila). Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. 2009. 