



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
México

Segura-Castruita, Miguel A.; Ortiz-Solorio, Carlos A.; Gutiérrez-Castorena, Ma. del Carmen
Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite: Parte 2. Factores que
Influyen en su Reflectancia y Clasificación Supervisada con los Procedimientos: Mínima Distancia y
Máxima Verisimilitud

Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 2, abril-junio, 2004, pp. 135-142
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322201>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

LOCALIZACIÓN DE SUELOS DE HUMEDAD RESIDUAL A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE: Parte 2. Factores que Influyen en su Reflectancia y Clasificación Supervisada con los Procedimientos: Mínima Distancia y Máxima Verisimilitud

Location of Residual Moisture Soils Using Satellite Images: Part 2. Factors that Affect its Reflectance and Supervised Classification of the Image with Minimum Distance and Maximum Likelihood Procedures

Miguel A. Segura-Castruita^{1‡}, Carlos A. Ortiz-Solorio¹ y
Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena¹

RESUMEN

Los suelos de humedad residual (SHR) cuentan con una firma espectral específica que permite obtener su mapa de localización por medio de una clasificación supervisada con el método del paralelepípedo, con 70% de confiabilidad; no obstante, se desconocen los factores que influyen en su reflectancia y si la eficiencia cartográfica se puede incrementar con otras metodologías. Diferentes características del suelo, como la arcilla y la materia orgánica, están relacionadas con su capacidad de retención de humedad, las que a su vez determinan su reflectancia; sin embargo los SHR se formaron a partir de piedra pómez y retienen humedad, lo cual permite suponer que este material parental, además, la arcilla y la materia orgánica, son responsables de su firma espectral. Los objetivos de esta investigación fueron establecer los factores que influyen en la reflectancia de los SHR y realizar una clasificación supervisada con los procedimientos de la mínima distancia, MINDIST y máxima verisimilitud, MAXLIKE del SIG Idrisi®, con el fin de mejorar la calidad del mapa de localización de estos suelos. Se analizaron física y químicamente muestras de los SHR del valle Puebla-Tlaxcala y Chalco. Los resultados obtenidos muestran que la pedregosidad de origen pomáceo de los SHR es la responsable de su reflectancia debido a su composición química. El mapa de localización de los suelos de humedad residual obtenido con el clasificador MINDIST mejoró su confiabilidad a 85%.

Palabras clave: Pómez, clasificación supervisada, MINDIST, MAXLIKE.

SUMMARY

Residual moisture soils (RMS) have a specific spectral signature that permits the construction of their location maps, with a supervised classification image and parallelepiped procedure, with a reliability of 70%. Nevertheless, the factors that affect its reflectance are not known, nor whether the percentage of cartographic reliability will be increased with other classification methodologies. Soil characteristics, such as clay and organic matter, are related to its water-holding capacity and, in turn, determine its reflectance. RMS originated from pumice, and they retain water; this leads us to hypothesize that the presence of this material, besides clay and organic matter, is responsible for its reflectance. The objectives of this study were to establish factors that affect the reflectance of RMS and to carry out a supervised classification with the tools both MINDIST (minimum distance) and MAXLIKE (maximum likelihood) of GIS Idrisi®, to improve its map location. Soil samples of RMS from Puebla-Tlaxcala and Chalco valley were analyzed in laboratory. The results show that pumice is responsible for reflectance of RMS because of its chemical components. The location map of RMS obtained with MINDIST classifiers has a reliability of 85%.

Index words: Pumice, supervised classification, MINDIST, MAXLIKE.

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, estado de México.

[‡] Autor responsable (cast@colpos.mx)

INTRODUCCIÓN

Los suelos de humedad residual (SHR) presentan texturas gruesas, tienen la capacidad de almacenar agua mucho más alta que los suelos arenosos y son productivos (Segura *et al.*, 2003); características que les confieren importancia agrícola y económica en áreas con agricultura de secano del valle Puebla-Tlaxcala y Valle de Chalco, ya que el rendimiento de maíz en grano que alcanzan es de al menos 4.0 t ha⁻¹ (Díaz *et al.*, 1999).

Segura *et al.* (2003) encontraron que los SHR se ubican en laderas y valles cercanos a los volcanes cuya distribución geográfica se determinó mediante una clasificación automática supervisada (clasificador PIPED del SIG Idrisi®) de una imagen de satélite Landsat 5-MSS, debido a que tienen una reflectancia específica. Más aún, estos autores mencionaron que el mapa generado con esta metodología tiene 70% de confiabilidad y plantearon como hipótesis que el resultado puede mejorarse si se realiza una clasificación supervisada con otros procedimientos. Aun cuando lograron establecer la distribución geográfica de los SHR con base en su reflectancia, no explican los factores o propiedades de estos suelos que intervienen en su firma espectral durante el período seco del año.

Se ha reportado que el porcentaje de arena y la concentración de sales tienen una relación directamente proporcional con la reflectancia del suelo, mientras que el contenido de humedad, la materia orgánica y la arcilla mantienen una relación inversa (Swain y Davis, 1978), lo que significa que su identificación a través del uso de imágenes de satélite es factible (Stoner y Baumgardner, 1981).

Además, se encontró que la reflectancia es afectada por la mineralogía del suelo y que, al relacionarla con el contenido de materia orgánica en diferentes suelos, permite su caracterización y separación (Dematte y García, 1999).

De acuerdo con Tanaka (1985) y Hamblin (1991), el contenido de humedad en diferentes suelos está relacionado directamente con la cantidad de arcilla y materia orgánica que presenten. Sin embargo, la presencia de piedra pómez altamente intemperizada también tiene influencia en la capacidad de retención de humedad de los suelos, debido a la presencia de alófono y ferrihidrita (Gamma-Castro *et al.*, 2000).

Los SHR se han formado a partir de piedra pómez (CIMMYT, 1974; Werner, 1978), lo que hace suponer que este material está relacionado con su capacidad de

retención de humedad y, por lo tanto, determina la reflectancia de los SHR, información que es necesario confirmar con datos de campo y de laboratorio. Por tal motivo, los objetivos de la presente investigación fueron establecer los factores que influyen en la reflectancia de los suelos de humedad residual y realizar una clasificación supervisada con otros procedimientos de clasificación con el fin de mejorar el mapa de localización de estos suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la porción sur-este del estado de México y oeste del estado de Puebla, entre los paralelos 18° 52' 05.4'' y 19° 24' 51.6'' N y los meridianos 98° 13' y 99° 08' 12.6'' O, con una altitud que fluctúa de 2240 a 2350 m.

Metodología

Para establecer los factores que influyen en la reflectancia de los SHR, se hizo un muestreo en los mismos sitios de entrenamiento empleados por Segura *et al.* (2003), que se reportan en el Cuadro 1; con el fin de determinar las características físicas y químicas de los suelos. Asimismo, para llevar a cabo las nuevas clasificaciones supervisadas, se volvieron a utilizar la ubicación de estos sitios y la misma imagen de satélite con el objeto de realizar el estudio en las mismas condiciones, para hacer posible la comparación de resultados; como se detalla a continuación.

Trabajo de campo y laboratorio. Se colectaron cinco muestras de suelo de 0 a 30 cm de profundidad en cada sitio, con un muestreo en zigzag; posteriormente, se mezclaron y se obtuvo una muestra compuesta. Se realizaron las siguientes determinaciones: análisis mecánico (textura), pedregosidad, materia orgánica y humedad gravimétrica (humedad de campo), con las metodologías reportadas en el Manual de Procedimientos para el Análisis de Suelos del ISRIC (Van Reeuwijk, 1995).

Análisis de la imagen de satélite. La localización de los suelos de humedad residual se estudió por medio del análisis de una imagen de satélite, a través de una clasificación supervisada con las siguientes características:

1. Se trabajó con una imagen Landsat 5-MSS la cual tiene un tamaño real de 4059 columnas y 3833

renglones con un total de 1 626 508 píxeles. El tamaño del píxel es de 60 x 60 m y sus coordenadas UTM son: X mín. 364 200 y X máx. 607 680, Y mín. 19 684 800 y Y máx. 2 194 800. La escena se captó el 07 de marzo de 1989. Se eligió esta escena para verificar si los suelos retenían humedad en esa fecha y por ser gratuita.

2. La máscara digital se elaboró a través de un recorte de la imagen para incluir sólo al área de estudio, para lo que se utilizaron las coordenadas extremas de la misma; el proceso se realizó con el Sistema de Información Geográfico (SIG) Idrisi®.

3. Los sitios de entrenamiento de los SHR se delimitaron con los puntos de georreferencia que se obtuvieron en campo (Cuadro 1). Los puntos se ubicaron en el recorte de la imagen de satélite Landsat 5-MSS (área de estudio) para formar cuatro polígonos que constituyeron los sitios de entrenamiento (SE).

4. La imagen se procesó utilizando las bandas MSS 1, 2 y 5 (Bandas 2, 3 y 6 del Landsat-TM), debido a que discriminan la humedad del suelo (Campbell, 1996). A cada parcela se le asignó un nombre de identidad (firma) con la herramienta Makesig del SIG Idrisi®; posteriormente, se clasificó con el clasificador MINDIST (mínima distancia) que es la segunda rutina más rápida y con el clasificador MAXLIKE (máxima verisimilitud) principal clasificador del sistema (Eastman, 1999).

Comprobación de resultados. Para la verificación de los mapas de localización de SHR, se retomaron 20 píxeles, 10 para cada categoría clasificada (SHR y No SHR), los que fueron empleados por Segura *et al.* (2003), reportados en el Cuadro 2, y se procedió a realizar la misma comprobación de campo; por último, los valores predichos en gabinete se contrastaron con los recabados en campo, para conocer el porcentaje de aciertos.

Cuadro 1. Ubicación de los sitios de entrenamiento con suelos de humedad residual (a partir de Segura *et al.*, 2003).

SE [†]	Lugar	Coordenadas UTM [‡]
1	Llano Calpan, Puebla	564971.1, 565210.0 2113582.0, 2113343.0
2	San Andrés Calpán, Puebla	562631.1, 562871.1 2114422.0, 2114182.0
3	San Juan Tianguismanalco, Puebla	559332.4, 559571.9 2100566.0, 2100326.0
4	Ayotzingo, Chalco Edo. de México	509184.3, 509424.2 2125879.0, 2125639.0

[†] SE = Parcela de entrenamiento; [‡] UTM = Universal Transversa Mercator.

Cuadro 2. Ubicación de los píxeles utilizados en la comprobación de campo (a partir de Segura *et al.*, 2003).

CC [†]	Sitio	Columna	Renglón	Coordenadas UTM	
				X	Y
SHR	1	467	321	513709.0	2127812
	2	462	511	513387.5	2116424
	3	488	928	514960.1	2091396
	4	462	948	513434.9	2090079
	5	1041	986	548164.1	2087910
	6	1129	851	553447.4	2096050
	7	1214	951	558527.2	2090050
	8	1500	751	575706.5	2102030
	9	1358	506	567185.3	2116716
	10	1269	347	561799.2	2126296
No SHR	1	412	246	510449.1	2132353
	2	472	477	514008.9	2118492
	3	426	795	511271.4	2099284
	4	657	771	515153.8	2100728
	5	546	939	518453.1	2090620
	6	1274	505	562148.8	2116804
	7	1095	843	551476.4	2096396
	8	1362	726	567522.3	2103435
	9	1238	657	572570.4	2107691
	10	1079	813	559589.4	2129606

[†] CC = categoría clasificada, SHR = suelos de humedad residual, No SHR = no suelos de humedad residual

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas y Químicas de los SHR

Los suelos de los sitios de entrenamiento presentan las siguientes características físicas y químicas (Cuadro 3): contenido de arena que varían de 78 a 87%, humedad entre 1.63 y 2.56%, arcilla de 3.58 a 13.25% y materia orgánica de 0.59 a 1.17%. Esto significa que los suelos son arenosos con bajo contenido de arcilla, materia orgánica y que retienen poca humedad superficial.

Cuadro 3. Propiedades físicas y químicas de los suelos arenosos de humedad residual.

SE [†]	HUM _{CS}	A _{CS}	R _{CS}	MO _{CS}	Pd _{CS}
	----- % -----				
1	1.73	84.81	11.77	0.64	11.06
2	1.98	78.36	13.25	0.59	11.15
3	2.56	86.66	3.28	0.79	25.97
4	1.63	83.39	5.86	1.17	10.19

[†] SE: parcelas de entrenamiento, HUM_{CS}: contenido de humedad de la capa superficial, A_{CS}: contenido de arena de la capa superficial, R_{CS}: contenido de arcilla de la capa superficial, MO_{CS}: contenido de materia orgánica de la capa superficial, Pd_{CS}: pedregosidad de la capa superficial.

Cuadro 4. Relaciones entre los porcentajes de arcilla, arena, materia orgánica y pedregosidad con la humedad de la capa superficial de los SHR.

Relaciones [†]	Ecuación	R ²
% A _{cs} vs. % HUM _{cs}	% HUM _{cs} = 0.0405 (% A _{cs}) - 1.4025	0.1198
% R _{cs} vs. % HUM _{cs}	% HUM _{cs} = - 0.0433 (% R _{cs}) + 2.3442	0.2412
% MO _{cs} vs. % HUM _{cs}	% HUM _{cs} = - 0.4613 (% MO _{cs}) + 2.3429	0.0844
% Pd _{cs} vs. % HUM _{cs}	% HUM _{cs} = 0.0521 (% Pd _{cs}) + 1.2146	0.9019

[†] HUM_{cs} = contenido de humedad de la capa superficial, A_s = contenido de arena de la capa superficial, R_s = contenido de arcilla de la capa superficial, MO_s = contenido de materia orgánica de la capa superficial, Pd_s = pedregosidad de la capa superficial.

De acuerdo con Tanaka (1985) y Hamblin (1991), la humedad está relacionada con algunas propiedades del suelo, como la cantidad de arcilla y la materia orgánica; sin embargo, en los SHR la relación entre estas propiedades resultó inversamente proporcional (Cuadro 4), mientras que el porcentaje de arena de estos suelos mostró una relación directa con la humedad. No obstante, la correlación entre estas propiedades es baja, lo que es indicativo de la poca influencia de la arcilla, arena y materia orgánica en el contenido de humedad.

Por otra parte, los SHR presentan porcentajes de pedregosidad de 10 a 26 (Cuadro 3), donde la piedra pómez es su principal componente (de 70 a 90%) y el resto se trata de basalto o andesita. Al relacionar la pedregosidad con el contenido de humedad de estos suelos (Cuadro 4), se obtuvo una relación directa (pendiente positiva). La retención de humedad en los suelos puede estar asociada con la morfología macro y microporosa de las partículas de la pómez no alterada o con un incipiente intemperismo por el bajo porcentaje de arcilla.

Relación entre los Valores de Reflectancia de los SHR y sus Propiedades Físicas y Químicas

Los intervalos de los valores de reflectancia (VR) de los píxeles dentro de los SE que se encontraron en cada banda (1, 2 y 5) de la imagen Landsat 5-MSS se reportan en el Cuadro 5.

Las variaciones que existen entre los límites de clase de los SE reflejan los diferentes contenidos de humedad que presenta el suelo superficial (Cuadro 6); por ejemplo, en las Bandas 1 y 2 disminuye la reflectancia conforme aumenta el contenido de humedad, como lo mencionaron Swain y Davis (1978). Sin embargo, el comportamiento de la Banda 5 es contrario; es decir, al aumentar el contenido de humedad del suelo aumenta la reflectancia. Campbell (1996) indicó que el agua tiene un alto índice de emisividad y que la Banda 5 lo capta debido a su intervalo de longitud de onda (10.4 µm a 12.6 µm).

Para establecer las relaciones entre los VR con las propiedades físicas y químicas de los suelos en estudio, se utilizaron los promedios de los VR y de las propiedades.

De acuerdo con Swain y Davis (1978), el contenido de arena del suelo, en general presenta una relación directamente proporcional con la reflectancia; mientras que la arcilla y la materia orgánica mantienen una relación inversa. Esta situación no se observa en los SHR, ya que la arena tiene una relación inversa a la reflectancia; en tanto que, para la arcilla y la materia orgánica, resulta directa. Sin embargo, la baja correlación que existe entre estas propiedades (Cuadro 7) indica que tienen poca o nula influencia en el comportamiento de la reflectancia. En cambio, el contenido de humedad sí influye sobre la reflectancia de los SHR (Figura 1).

Cuadro 5. Rangos de valores de reflectancia de los sitios de entrenamiento de los suelos de humedad residual.

SE [†]	Banda 1		Banda 2		Banda 5	
	LC [‡]	$\bar{X} \pm \sigma$ [§]	LC	$\bar{X} \pm \sigma$	LC	$\bar{X} \pm \sigma$
1	31-35	31-33	42-49	42-47	96-103	97-101
2	30-35	31-35	40-48	42-47	93-102	96-99
3	26-35	29-34	36-46	40-45	98-114	99-107
4	31-35	31-34	41-48	43-46	90-100	90-96

[†] SE = sitios de entrenamiento; [‡] LC = límite de clases; [§] \bar{X} = media; σ = desviación estándar.

Cuadro 6. Contenido de humedad de la capa superficial de los suelos de humedad residual en los sitios de entrenamiento y su reflectancia promedio.

SE	HUM _{CS}	Banda 1	Banda 2	Banda 5
	%	Re	Re	Re
1	1.73	32.1875	44.5000	99.0000
2	1.98	32.0625	44.0625	96.5625
3	2.56	31.6875	42.4375	103.000
4	1.63	32.3125	44.5625	93.3125

SE = parcela de entrenamiento, HUM_{CS} = contenido de humedad de la capa superficial Re = valor de reflectancia promedio.

Por otra parte, la pedregosidad es inversamente proporcional (pendiente negativa) a los VR de las Bandas 1 y 2, con una r^2 igual a 0.8907 y 0.9633, respectivamente (Cuadro 7); mientras que, con la Banda 5 presenta una relación directa. Esto significa que la piedra pómez en los SHR tiene influencia en su reflectancia por su capacidad de retener humedad.

Sin embargo, las ciudades cercanas (México y Puebla) tuvieron los mismos VR que los suelos de humedad residual; como la escena se captó en la temporada seca (marzo), las ciudades no presentaban humedad, lo cual indica que la reflectancia en los SHR no es provocada por el agua retenida. Segura *et al.* (2003) explicaron que esto se debe a la composición química de sus principales materiales, pómez para los SHR y cemento para las ciudades,

donde domina el SiO₂. Por otra parte, Dematte y García (1999) indicaron que la curva espectral de diferentes componentes del suelo (minerales y materia orgánica) se expresan mejor con la ausencia de la humedad. Por lo tanto, la composición química y mineralógica de la pómez de los SHR es la que influye en su reflectancia.

Clasificación de la Imagen

Esta clasificación se realizó de dos formas: una con el clasificador MINDIST (mínima distancia) y otra con el MAXLIKE (máxima similitud).

Para utilizar el clasificador MINDIST se requiere informar al sistema si se utilizarán los valores de reflectancia (VR) crudos o de unidades de desviación estándar de VR (σ -VR), así como el definir la máxima distancia espectral a explorar que puede ser infinita o específica (Eastman, 1999). En el presente trabajo, se optó por utilizar las unidades de σ -VR, las cuales se obtuvieron al analizar las σ de los VR de cada uno de los SE en el área de estudio y para cada banda (Cuadro 8); mientras que la máxima distancia espectral a explorar (mde) es el promedio de las σ , aproximado al número entero inmediato, en este caso resultó de 2.

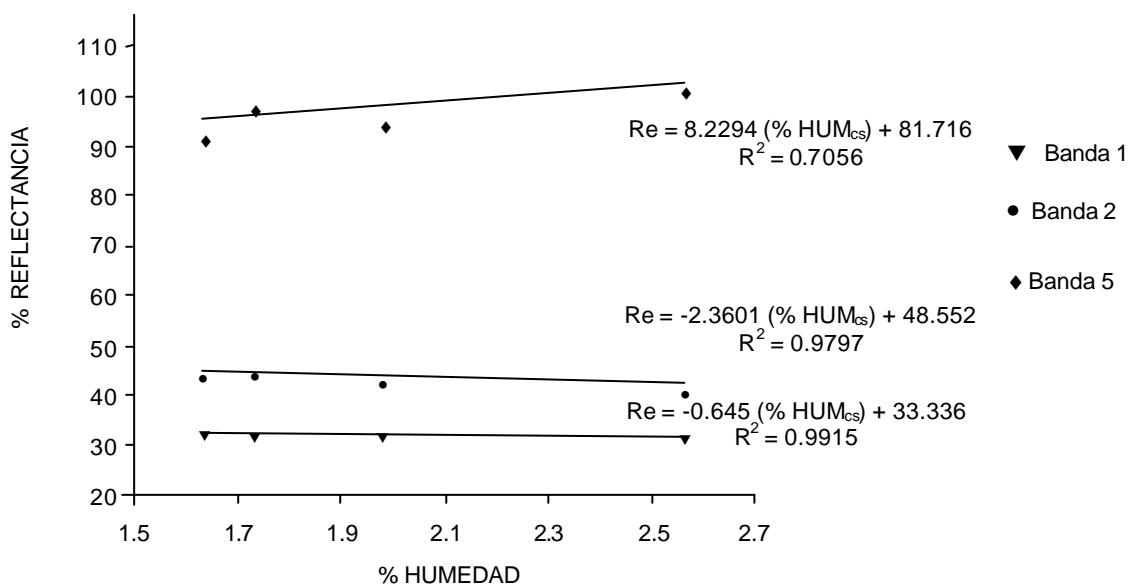


Figura 1. Relación entre el porcentaje de humedad de los suelos de humedad residual y las reflectancias promedio de las Bandas 1, 2 y 5.

Cuadro 7. Resultados de las relaciones entre los porcentajes de arena, arcilla y materia orgánica con la reflectancia de las Bandas 1, 2 y 5.

Relación [†]	Banda 1		Banda 2		Banda 5	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
A _{cs} vs. Re	Re=-0.0255(A _{cs})+34.36	0.0132	Re=-0.1215(A _{cs})+54.31	0.2005	Re=0.658(A _{cs})+43.15	0.3286
R _{cs} vs. Re	Re=0.025(R _{cs})+31.84	0.1973	Re=0.1278(R _{cs})+41.36	0.3716	Re=-0.256(R _{cs})+100.16	0.0884
MO _{cs} vs. Re	Re=0.253(MO _{cs})+31.82	0.2477	Re=0.5918(MO _{cs})+43.33	0.0996	Re=-4.98(MO _{cs})+102.63	0.4188
Pd _{cs} vs Re	Re=-0.0335(Pd _{cs})+32.55	0.8908	Re=-0.1284(Pd _{cs})+45.76	0.9633	Re=0.4558(Pd _{cs})+91.32	0.7192

[†] A_{cs} = contenido de arena de la capa superficial, R_{cs} = contenido de arcilla de la capa superficial, MO_{cs} = contenido de materia orgánica de la capa superficial, Re = reflectancia.

Después de clasificar la imagen, se obtuvo un mapa con dos categorías de clase; suelos de humedad residual (SHR) y otros suelos (No SHR) a la que se le adhirió una máscara de las ciudades del Distrito Federal y Puebla, y se obtuvo el mapa de localización de los SHR con el clasificador MINDIST (Figura 2).

El mapa muestra que los SHR se encuentran a los alrededores de la sierra Nevada y se concentran en los valles Puebla -Tlaxcala y Chalco.

Con el clasificador MAXLIKE, la firma o etiqueta de los SE se especificó por separado, aunque en este caso se trata de una sola, la de "los suelos de humedad residual" (SHR); además, la proporción de exclusión que se utilizó fue de 5%, debido a que, al emplear los porcentajes de 0 y 1, el número de píxeles que intervienen en la clasificación es mayor, por lo que se

podría obtener un mapa con un mayor número de errores.

El mapa que se obtuvo con el MAXLIKE es similar al del clasificador MINDIST; sin embargo, existe un mayor número de píxeles que aparecen clasificados como SHR.

Comprobación de los Resultados de la Clasificación de la Imagen de Satélite

Esta comprobación, como se mencionó anteriormente, se realizó en los sitios de campo seleccionados por Segura *et al.* (2003) (Figura 3).

Los SHR presentan texturas arenosas, tienen la capacidad de retención de humedad, su uso es agrícola con un sistema de producción de secano, tienen pendientes que fluctúan de 3 a 10% y presencia de piedra pómez de diferentes tamaños en la superficie. Sin embargo, los Sitios 7, 8 y 9, a pesar de presentar estas características, no se tomaron en cuenta debido a que presentan un manejo diferente.

Los resultados mostraron que en la categoría para SHR, en los clasificadores MINDIST y MAXLIKE, se tuvieron en campo siete sitios correctos y tres con errores. Mientras que para la categoría de No SHR, el mapa obtenido con el MINDIST tuvo diez aciertos y el elaborado con el clasificador MAXLIKE sólo nueve (Cuadro 9).

Esto se debe a la forma cómo funcionan los clasificadores. De acuerdo con Eastman (1999), el MAXLIKE, siendo la técnica más avanzada de Idrisi®, requiere de que el número de píxeles en el conjunto de datos para la evaluación sea de 50 a 100 veces el número de bandas que intervengan en la clasificación y que los sitios sean homogéneos, para producir mejores resultados. Por otra parte, el mismo autor mencionó que el clasificador MINDIST produce buenos resultados, aun cuando los sitios de entrenamiento sean pocos.

Cuadro 8. Desviación estándar de los sitios de entrenamiento.

Banda	SE [†]	σ	σ _p	mde
1	1	1.22	2.0025	
	2	2.46		
	3	2.70		
	4	1.63		
2	1	2.25	2.4475	
	2	2.99		
	3	2.92		
	4	1.63		
5	1	1.75	2.7150	
	2	2.09		
	3	4.13		
	4	2.89		
Total			7.1650	
Prom.			2.3883	2

[†] SE = sitio de entrenamiento; σ = desviación estándar; σ_p = desviación estándar promedio; mde = máxima distancia espectral a explorar.

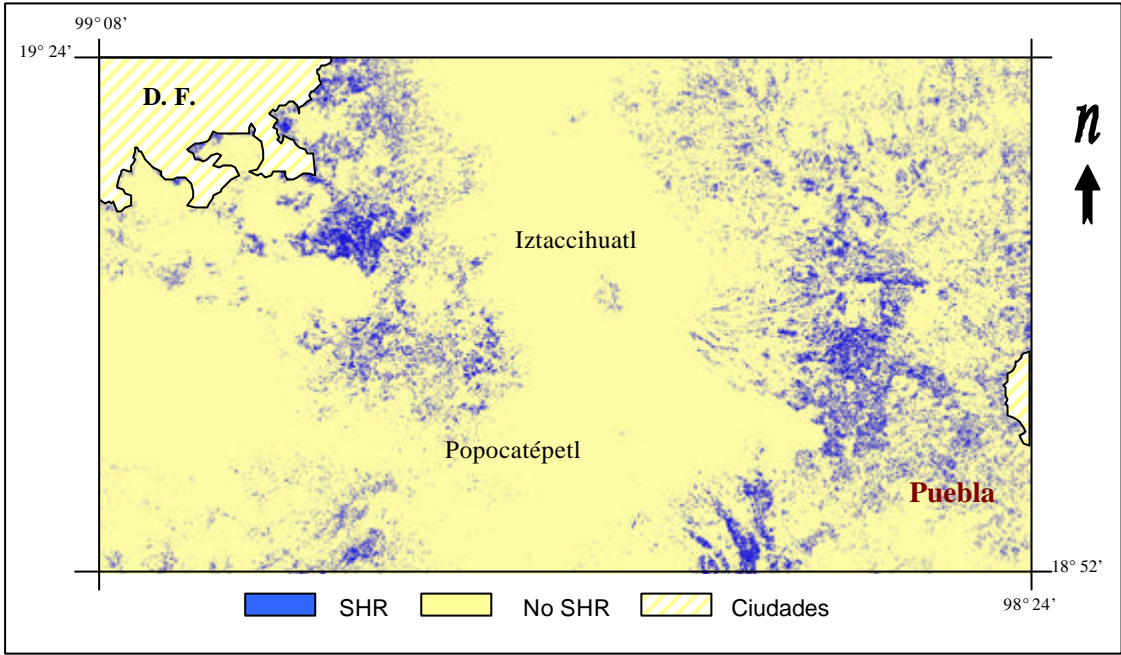


Figura 2. Localización de los Suelos de Humedad Residual con el clasificador MINDIST.

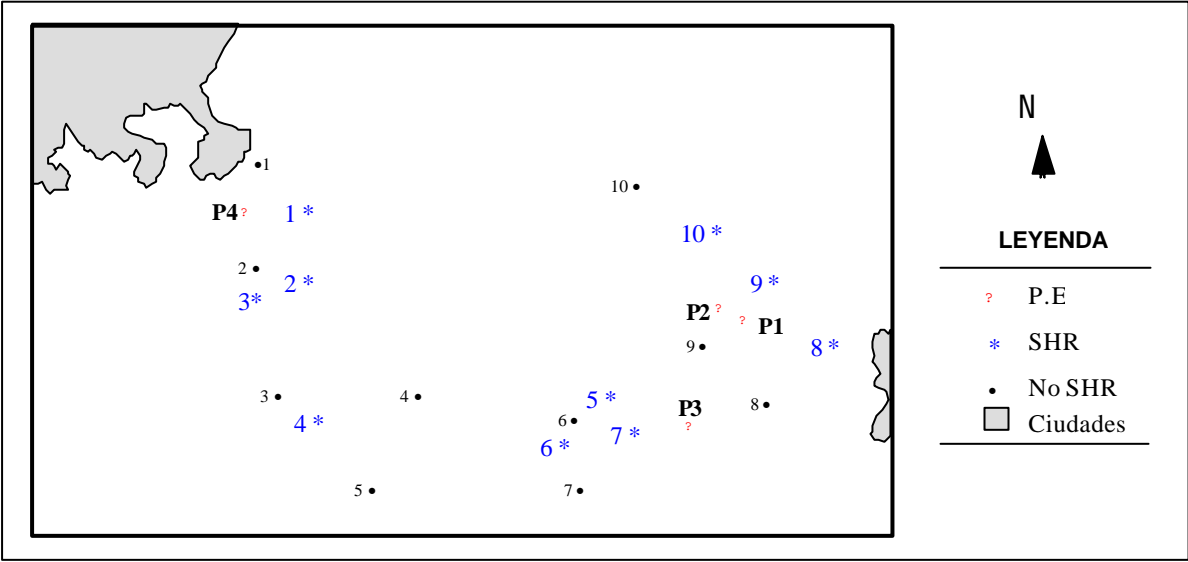


Figura 3. Ubicación de puntos de comprobación de sitios con SHR y No SHR (a partir Segura *et al.*, 2003).

Cuadro 9. Resultado de la corroboración de los mapas de localización de los suelos de humedad residual en campo.

CC [†]	Sitio	MAXLIKE		MINDIST	
		acierto	error	acierto	error
SHR	1	x		x	
	2	x		x	
	3	x		x	
	4	x		x	
	5	x		x	
	6	x		x	
	7		x		x
	8		x		x
	9		x		x
	10	x		x	
No SHR	1	x		x	
	2	x		x	
	3	x		x	
	4	x		x	
	5	x		x	
	6	x		x	
	7	x		x	
	8	x		x	
	9	x		x	
	10		x	x	
Total	20	16	4	17	3
% de confiabilidad		80		85	

[†]CC = categoría clasificada, SHR = suelos de humedad residual, No SHR = no suelos de humedad residual.

Con base en lo anterior y considerando los datos con los que se desarrollaron las clasificaciones, puede mencionarse que la utilización del clasificador MAXLIKE en este estudio no fue adecuado, por el número de píxeles que se empleó, de 64, cuando debieron ser un número mayor, 150 como mínimo. Lo cual produce un mapa que presenta cuatro errores, esto es una confiabilidad de 80%.

En cambio, el clasificador MINDIST, al utilizar un rango de valores más corto, donde involucra a la media y a la desviación estándar de los VR de los SE, elimina errores e incrementa la confiabilidad del mapa (85%), aun cuando el número de sitios sea pequeño y, por ende, el número de píxeles.

CONCLUSIONES

- La pedregosidad de origen pomáceo es la responsable de la reflectancia de los SHR debido a su composición química y mineralógica más que a la humedad retenida.
- El mapa de localización de los suelos de humedad residual obtenido con el uso del clasificador mínima distancia (MINDIST) resultó el de mayor calidad (85% de confiabilidad).

LITERATURA CITADA

- Agbu, P.A., D. Fehrenbacher e I.J. Jansen. 1989. Soil property relationships with SPOT satellite digital data in East Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(3): 807-812.
- Agbu, P.A., D. Fehrenbacher e I.J. Jansen. 1990. Statistical comparison of SPOT spectral maps with field soil maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(3): 812-818.
- Baumgardner, M.F., L.F. Silva, L.L. Biehl y E.R. Stoner. 1985. Reflectance properties of soils. *Adv. Agron.* 38: 1-44.
- Campbell, J.B. 1996. Introduction to remote sensing. Second ed. Virginia Polytechnic Institute and State University. The Guilford Press. New York.
- CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 1974. El Plan Puebla: Siete años de experiencia: 1967-1973. El Batán, Texcoco, México.
- Dematte M., J.A. y G.J. García. 1999. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 327-342.
- Díaz C., H., L. Jiménez S., R.J. Laird y A. Turrent F. 1999. El Plan Puebla 1967-1992. Análisis de una estrategia de desarrollo de la agricultura tradicional. Colegio de Postgraduados. México.
- Eastman, J.R. 1999. Idrisi 32. Guide to GIS and Image Processing. Volume 1. Clark Labs. Clark University. Worcester, MA.
- Frazier, B.F. y A.J. Bussaca. 1988. Soil patterns of the Palouse region as seen by Landsat Thematic Mapper. *Agron. Abstr.* 35: 256.
- Gamma-Castro, J.E., E. Sollerio-Rebolledo y E. Vallejo-Gómez. 2000. Weathered pumice influence on selected alluvial soil properties in West Nayarit, Mexico. *Soil Tillage Res.* 55: 143-165.
- Hamblin, A.P. 1991. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-157.
- Lee, K.S., G. Lee y E. Tyler. 1988. Thematic mapper and digital elevation modeling of soil characteristics in hill terrain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1104-1107.
- Navone, S.M. 1998. Identificación de la erosión mediante el análisis de imágenes de satélite. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 13: 253-263.
- Segura C., M.A., C.A. Ortiz S. y M.C. Gutiérrez C. 2003. Localización de suelos de humedad residual a partir de imágenes de satélite. Parte I. Clasificación automática supervisada de la imagen. *Terra* 21: 149-156.
- Stoner, E.R. y M.F. Baumgardner. 1981. Characteristic variations on reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1161-1165.
- Swain, P.H. y S.M. Davies. 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill. New York.
- Tanaka, D.L. 1985. Chemical and stubble-mulch fallow influences on seasonal soil water contents. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 728-733.
- Van Reeuwijk, L.P. 1995. Procedures for soil analysis. Tech. Pap. 9. 5th ed. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Werner, G. 1978. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores (comentarios a un mapa de suelos). Suplemento Comunicaciones. Fundación Alemana para la Investigación Científica. Puebla, México.