

UTILIZACIÓN DEL GROUND PENETRATING RADAR EN EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE HORIZONTES ESPÓDICO Y ARGÍLICO EN EL CENTRO-NORTE DE FLORIDA

Antonio LÓPEZ PIÑEIRO¹; M.E. COLLINS²; R. KUEHL²; A. GARCÍA NAVARRO¹

1. Cátedra de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias. Universidad de Extremadura. 06075 Badajoz.

2. Soil and Water Science Department. University of Florida. Gainesville FL 32611-0290.

Abstract: In order to determine if use of the Ground Penetrating Radar could help to determine variability of diagnostic subsurface horizons and to design map units, a 1600 m transect was set up along a trail through the San Felasco Hammock State Preserve (Florida). Ground Penetrating Radar (GPR) was compared with conventional field techniques to obtain the necessary data. The results demonstrate that GPR is useful in determining depths and spatial variability of spodic and argillic horizons.

Key words: Ground Penetrating Radar, spodic horizon, argillic horizon.

Resumen: Se ha efectuado un transecto de 1600 m de longitud en la reserva estatal de San Felasco en Florida (USA) y sobre una unidad cartográfica que engloba un área de gran complejidad edáfica con suelos que presentan un espesor importante, se utiliza la técnica del Ground Penetrating Radar (GPR), para determinar su utilidad tanto en la identificación de los horizontes espódico y argílico como en la determinación de la variabilidad de dichos horizontes y de otras características subsuperficiales. Los resultados derivados del GPR son comparados con los obtenidos mediante técnicas convencionales de campo. Se pone de manifiesto la efectividad del GPR para localizar y determinar la continuidad espacial de los horizontes diagnósticos objeto de este estudio.

Palabras clave: Radar, horizonte espódico, horizonte argílico

INTRODUCCIÓN

El Ground Penetrating Radar es un método de sondeo electromagnético, de uso en campo, que suministra perfiles de alta resolución y en los que se identifican propiedades subsuperficiales hasta una profundidad de varios metros (Doolittle, 1987; Collins et al., 1989). En su aplicación al estudio de suelos, el GPR ha sido utilizado para

determinar la profundidad, extensión y variaciones laterales de horizontes diagnósticos tales como sálico, espódico, álbico, argílico y otras propiedades edáficas relevantes como acumulaciones de materia orgánica, lamelas iluviales, líneas de piedras, etc. El éxito del GPR en los estudios de campo está directamente relacionado con las condiciones del suelo a través del cual los pulsos electromagnéticos tienen que viajar;

esta bien documentado que la penetración de las radiaciones electromagnéticas en el suelo es una función del nivel de humedad del mismo, el contenido en sales, la cantidad y tipo de arcilla así como de otros niveles restrictivos que dificultan la penetración de las mencionadas radiaciones (Shih y Doolittle, 1984; Collins et al., 1990 y López-Piñeiro et al., 1994). El GPR detecta cambios abruptos en las propiedades dieléctricas del suelo. Estas propiedades están determinadas principalmente por el contenido en agua, ya que en suelos secos la constante dieléctrica oscila entre 3 y 5 mientras que para el agua este valor es de 80. Los mejores resultados utilizando GPR como técnica de sondeo se obtienen en suelos cuyos horizontes tienen bajo contenido en arcilla y baja conductividad eléctrica. El procesamiento mediante ordenador de los datos recogidos con GPR provee nítidos diagramas bi o tridimensionales que muestran la variación de la profundidad de estos horizontes y propiedades, con lo que se consigue mejorar las interpretaciones y, en consecuencia, simplificar la composición de las unidades cartográficas en los mapas de suelos (Puckett et al., 1994; Mokma et al., 1990). El método es rápido y en muchas áreas puede complementar el tradicional método de muestreo directo.

La reserva estatal de San Felasco en Florida (USA) ofrece una excelente oportunidad de estudiar suelos en un área con diversidad de vegetación y paisajes. Los suelos ofrecen en una extensión relativamente reducida epipedones ócrico, úmbrico, hístico, endopedones espódico, argílico y niveles de ortstein; el GPR detecta discontinuidades que, contrastadas con la información obtenida por procedimientos clásicos, permiten interpretarlas como los rasgos edáficos (López-Piñeiro et al., 1994).

El propósito de este estudio fue determinar la efectividad del GPR en el estudio de la variabilidad (variación inter-pedones) de horizontes espódico y argílico, detección de niveles de ortstein y oscilaciones en la zona saturada de agua, en un área donde las variaciones laterales

de estos horizontes, presentes a gran profundidad, hubieran sido muy difíciles de detectar por técnicas convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se efectuó en la Reserva Estatal de San Felasco, localizada en el centro-norte de la península de Florida (EE.UU.). El clima de esta zona se caracteriza por una precipitación que oscila entre 1270 y 1520 mm por año y una temperatura media anual de 22°C. La topografía es llana con una altitud que varía entre los 25 m de las zonas más bajas y los 60 m de las más elevadas. La reserva contiene una representación de casi todas las especies forestales existentes en el norte de Florida. En el área de estudio la vegetación dominante es típica de la comunidad "hardwood hammock" dominada por especies esciofilas, alternando con áreas donde predomina *Quercus laevis* (Dunn, 1982). Los suelos están desarrollados sobre sedimentos marinos francos y arenosos y con anterioridad a este estudio se clasificaron como Haplumbrept quartzipsamméntico arenoso, síliceo, hipertérmico (SSS, 1975).

Los sistemas de GPR están dotados de una antena que emite unos pulsos electromagnéticos de radio-frecuencia a través de un determinado medio, por ejemplo el suelo. Cuando la energía emitida encuentra una discontinuidad en las propiedades eléctricas de dicho medio, parte de las señales emitidas son reflejadas hacia el receptor del radar mientras que el resto continua su penetración en el medio. El sistema de radar usado fue el Subsurface Interface Radar (SIR), sistema-3 (Geophysical Survey Systems, INC., North Salem, NH). La antena utilizada para este estudio es de 300 MHz, y fue arrastrada mediante un vehículo cuya velocidad era de 7 km/h. Los tiempos fijados para explorar fueron de 175 ns, con unas relaciones de 25.6 registros por segundo. Aquellas señales reflejadas que posteriormente fueron interceptadas por el receptor del radar se registraron en

un magnetófono para su posterior análisis y procesamiento mediante el paquete informático "Radan 3 computer software program" suministrado por Geophysical Survey Systems, Inc. El procesamiento con este programa elimina la mayor parte de las señales de fondo que distorsionan las imágenes, permitiendo que éstas sean muy claras y puedan ser asociadas a diferentes rasgos edáficos con mayor facilidad. Para la interpretación de las imágenes obtenidas se ha utilizado la metodología indicada por Collins (1990).

El radar fue utilizado en un transecto de 1600 m de longitud, donde alternan áreas con diferente vegetación y paisaje. Se efectuaron múltiples observaciones (muestreo de suelos con barrena) y se describieron, analizaron y clasificaron (Soil Survey Staff, 1992) (tablas 1 y 2) los suelos en seis puntos del transecto (A, B, C, D, E y F) localizados a intervalos de 280 m, hasta una profundidad que varió entre 300 y 440 cm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 aparece la clasificación de cada uno de los seis suelos considerados, junto con su lugar de observación en el transcurso del transecto. Dos pediones (A y B) se clasificaron como inceptisoles, tres (C, D, y F) como entisoles y uno de ellos (E), con un horizonte espódico a

una profundidad inferior a 200 cm, como espodosol.

En la figura 1 se presentan un perfil continuo para los 1600 m del transecto obtenido mediante GPR así como la interpretación del mismo. En general se aprecian en todo el perfil dos registros bien diferenciados; el primero de ellos, más superficial, corresponde al horizonte espódico (Bh) y aparece casi continuo, la profundidad de dicho horizonte oscila entre 165 y 320 cm a lo largo del transecto. El segundo de los registros coincide con el horizonte argílico (Bt) y/o zona saturada de agua, aunque en la mayor parte del área estudiada, esta última se encuentra por encima del argílico, diferenciándose con nitidez ambas propiedades en las imágenes de radar.

El radar es capaz de mostrar con claridad la profundidad a la que se encuentra el horizonte espódico, debido al fuerte contraste de humedad existente entre este horizonte y el E que le precede. Aunque la traza del espódico aparece casi continua en las imágenes obtenidas por radar, ésta fue variable en cuanto a su grado de expresión. Las áreas más oscuras y de mayor espesor coinciden con horizontes espódico de color más oscuro y con un mayor desarrollo en las observaciones. A modo de ejemplo, el pedión localizado en el punto E, con una imagen de radar nítida y espesa, presenta un espódico muy oscuro de aproximadamente 175 cm de espesor; por el contrario, en la posición A se observa

Tabla 1. Clasificación de los suelos en las observaciones seleccionadas durante el transecto de 1600 m de longitud

Localización	Clasificación (SSS, 1992)
A	Haplumbrept quartzipsamméntico arenoso silíceo hipertérmico
B	Haplumbrept quartzipsamméntico arenoso silíceo hipertérmico
C	Quartzipsamment típico hipertérmico uncoated
D	Quartzipsamment típico hipertérmico uncoated
E	Haplorthod típico arenoso silíceo hipertérmico
F	Quartzipsamment típico hipertérmico uncoated

Tabla 2. Características morfológicas, materia orgánica y análisis granulométrico

Horiz	Profund. (cm)	Color húmedo	Text	Estr.	Consist. húmedo	M.O. %	Arena %	Limo %	Arc. %
<u>Observación A</u>									
A1	0-20	10YR 2/2	fs	lfsbk	vfr	2.27	92.30	4.79	2.91
A2	20-46	10YR 3/2	fs	lfsbk	vfr	1.15	93.80	3.78	2.43
E1	46-64	10YR 4/3	fs	s	l	0.78	94.57	3.53	1.90
E2	64-88	10YR 5/6	fs	s	l	0.37	94.83	3.39	1.77
E3	88-130	10YR 5/4	fs	s	l	0.39	95.42	2.97	1.61
E4	130-152	10YR 5/3	fs	s	l	0.66	94.07	4.59	1.34
E5	152-180	7.5YR 6/2	fs	s	l	0.91	93.04	5.41	1.55
E6/Bh	180-195	7.5YR 4/2	fs	s	l	0.96	93.00	5.44	1.56
E7	195-270	7.5YR 5/2	fs	s	l	0.93	94.09	4.94	0.97
E8	270-285	7.5YR 7/2	fs	s	l	0.95	93.72	3.51	2.69
Bt1	285-290	10YR 7/2	scl	lmsbk	fi	0.14	69.91	4.48	25.60
Bt2	290-300	10YR 7/1	scl	lmsbk	fi	0.14	84.99	3.01	12.00
<u>Observación B</u>									
A1	0-25	10YR 3/2	fs	lfsbk	vfr	1.97	95.29	3.00	1.71
A2	25-58	10YR 3/3	fs	lfsbk	vfr	1.02	95.02	4.09	0.89
E1	58-90	10YR 4/2	fs	s	l	0.80	94.42	4.12	1.46
E2	90-120	10YR 5/3	fs	s	l	0.39	95.19	3.68	1.13
E3	120-145	10YR 5/4	fs	s	l	0.36	95.29	3.35	1.36
E4	145-190	7.5YR 5/4	fs	s	l	0.42	95.46	4.18	1.35
E5	190-210	7.5YR 5/2	fs	s	l	0.35	93.36	6.23	0.42
E6	210-240	7.5YR 6/2	fs	s	l	0.24	95.17	4.59	0.24
E7	240-280	7.5YR 6/4	fs	s	l	0.25	95.18	4.56	0.26
E8	280-320	7.5YR 6/2	fs	s	l	0.21	94.98	4.79	0.23
Bh1	320-340	7.5YR 3/2	fs	lfsbk	fr	0.54	90.52	8.19	1.29
Bh2	340-410	7.5YR 2/2	fs	lfsbk	fr	0.84	95.87	2.82	1.31
Bh3	410-420	7.5YR 3/2	fs	lfsbk	fr	0.60	98.18	3.60	1.22
<u>Observación C</u>									
A	0-20	10YR 4/2	fs	lfsbk	vfr	1.13	95.70	3.06	1.24
E1	20-55	10YR 5/3	fs	s	l	0.75	95.88	3.26	0.86
E2	55-75	10YR 5/2	fs	s	l	0.47	96.21	2.63	0.47
E3	75-105	10YR 5/4	fs	s	l	0.34	96.76	2.68	0.56
E4	105-125	10YR 6/4	fs	s	l	0.23	96.82	2.96	0.22
E5	125-140	10YR 6/6	fs	s	l	0.17	96.96	2.63	0.40

Tabla 2. (Continuación)

Horiz	Profund. (cm)	Color húmedo	Text	Estr.	Consist. húmedo	M.O. %	Arena %	Limo %	Arc. %
E6	140-165	10YR 7/4	fs	s	l	0.12	97.08	2.74	0.18
E7	165-185	10YR 7/3	fs	s	l	0.11	97.11	2.79	0.10
E8	185-210	10YR 8/2	fs	s	l	0.06	97.64	2.17	0.19
E9	210-220	7.5YR 6/2	fs	s	l	0.15	97.70	2.18	0.12
E10	220-245	7.5YR 5/2	fs	s	l	0.18	96.40	2.98	0.62
Bh1	245-275	7.5YR 3/2	fs	lfsbk	fr	0.48	97.50	2.38	0.12
Bh2	275-325	7.5YR 2/2	fs	lfsbk	fr	0.64	97.79	1.65	0.53
Bh3	325-360	10YR 2/1	fs	lfsbk	fr	1.75	97.57	2.25	0.18
<u>Observación D</u>									
A	0-12	10YR 3/2	fs	lfsbk	vfr	0.29	96.53	3.00	0.47
E1	12-25	10YR 5/3	fs	s	l	0.14	96.02	3.55	0.43
E2	25-45	10YR 5/4	fs	s	l	0.11	97.28	2.23	0.49
E3	45-110	10YR 5/6	fs	s	l	0.09	96.73	2.60	0.67
E4	110-155	10YR 7/3	fs	s	l	0.05	97.27	2.05	0.68
E5	155-180	10YR 8/2	fs	s	l	0.01	98.08	1.23	0.10
E6	180-280	10YR 8/1	fs	s	l	0.05	98.65	1.23	0.12
E7	280-305	7.5YR 8/2	fs	s	l	0.04	97.79	2.10	0.11
Bh1	305-360	7.5YR 3/2	fs	lfsbk	fr	0.39	88.39	8.89	2.71
Bh2	360-400	7.5YR 2/2	fs	lfsbk	fr	1.21	90.48	7.82	1.70
Bhs	400-468	5YR 2/2	fs	lfsbk	fr*	0.86	96.85	2.71	0.44
<u>Observación E</u>									
A	0-20	10YR 4/2	fs	lfsbk	vfr	0.57	94.49	4.00	1.01
E1	20-65	10YR 5/3	fs	s	l	0.39	96.11	3.16	0.74
E2	65-80	10YR 5/4	fs	s	l	0.17	95.21	3.98	0.81
E3	80-95	10YR 6/6	fs	s	l	0.01	95.84	3.52	0.63
E4	95-115	10YR 7/4	fs	s	l	0.01	96.71	2.59	0.70
E5	115-140	7.5YR 7/2	fs	s	l	0.17	96.51	2.59	0.90
E6	140-175	7.5YR 4/2	fs	s	l	0.26	93.56	5.59	0.86
Bh1	175-240	7.5YR 2/2	fs	lfsbk	fr	0.70	93.66	5.73	0.62
Bh2	240-310	10YR 2/1	fs	lfsbk	fr	2.30	96.11	3.43	0.46
Bh3	310-350	7.5YR 3/2	fs	lfsbk	fr	0.52	95.90	2.66	1.44
Bw	350-400	10YR 4/2	fs	lfsbk	fr	0.11	96.42	2.01	1.57
Bt	400-410	10YR 8/2	scl	lmsbk	fi	0.01	80.12	2.97	16.90

Tabla 2. (Continuación)

Observación F									
Horiz	Profund. (cm)	Color húmedo	Text	Estr.	Consist. húmedo	M.O. %	Arena %	Limo %	Arc. %
A	0-20	10YR 4/2	fs	lfsbk	vfr	1.46	92.97	3.77	3.26
E1	20-60	10YR 5/2	fs	s	l	0.78	95.61	2.26	2.12
E2	60-85	10YR 5/3	fs	s	l	1.06	96.67	2.49	0.84
E3	85-165	10YR 6/4	fs	s	l	0.40	95.17	3.26	1.57
E4/Bhs*	165-195	7.5YR 4/2	fs	s	1*	0.55	93.14	4.93	1.93
E5	195-230	7.5YR 6/2	fs	s	l	0.38	94.65	4.67	0.68
E6	230-300	10YR 7/2	fs	s	l	0.22	97.94	1.42	0.64
E7	300-350	10YR 5/2	fs	s	l	0.14	97.96	1.82	0.21
E8	350-370	10YR 8/2	fs	s	l	0.10	98.17	1.26	0.56

Abreviaturas codificadas de acuerdo con Soil Survey Staff (1975, Apéndice I). *abundante material cementado (ortstein)

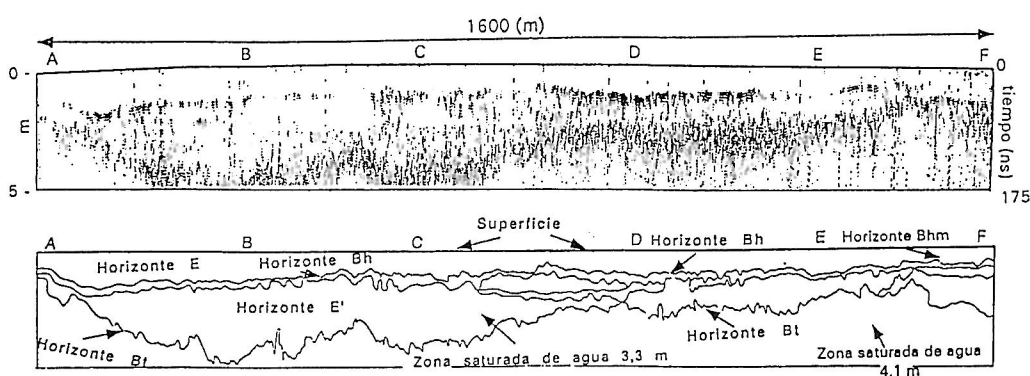


Fig. 1. Perfil continuo para los 1600 m de longitud del transecto obtenido mediante la utilización del GPR e interpretación del mismo.

un espódico muy incipiente de 15 cm de espesor, siendo en este caso la imagen obtenida con el radar apenas visible. Próximo al final del transecto, punto F, el horizonte espódico aparece cementado a unos 128 cm de profundidad, siendo esta cementación recogida también por las imágenes del radar, lo que indica la utilidad

del mismo también en el estudio de la continuidad de los niveles de ortstein.

El horizonte argílico y la zona saturada de agua varían también en profundidad y en el grado de expresión a lo largo del transecto. Las zonas más oscuras de las imágenes indican una fuerte contraste entre el horizonte álbico areno-

so y el horizonte argílico, ocasionado por la gran diferencia en el contenido de arcilla que presenta uno (1.6 a 2.7 %) frente al otro (16.9 a 25.6 %).

Para el conjunto de las seis observaciones se aprecia una fuerte disminución del contenido en humedad para los horizontes álbico y un incremento significativo en los horizontes espódico.

En la observación A existe un horizonte argílico a unos 280 cm de profundidad, siendo en este horizonte donde se aprecia el mayor contenido de humedad. Las observaciones C y D presentan menor contenido en materia orgánica y arcilla en los horizontes superficiales, coincidiendo con ellos escasos porcentajes de humedad. La observación F presenta un horizonte superficial con el mayor porcentaje en arcilla y también ofrece un mayor contenido en humedad que sus homólogos de las restantes observaciones.

Respecto a las profundidades a las que se encuentran las propiedades analizadas, se observa perfecta coincidencia entre las estimadas a partir de las imágenes del radar y las obtenidas mediante observación directa. Las desviaciones fueron de 0 a 10 cm para el horizonte espódico, de 0 a 15 cm para el argílico y zona saturada de agua, mientras que en los niveles de ortstein la desviación no supera los 5 cm.

CONCLUSIONES

El GPR fue capaz de mostrar horizontes o características importantes del suelo, cuyas variaciones en profundidad y distribución espacial difícilmente hubieran sido detectadas mediante las técnicas convencionales utilizadas en la investigación de suelos.

Estudios anteriores a la utilización del radar en la zona considerada no ponían de manifiesto la presencia de horizontes espódico, obviándose la representación de espodosoles.

La aplicación del GPR también mostró que la profundidad del horizonte argílico fue extre-

madamente variable y mucho más profundo de lo que cabría esperar.

Las oscilaciones freáticas entre la zona no saturada y la superficie piezométrica que tan excelentemente fueron registradas por el GPR, pueden suministrar una valiosa información para el estudio del transporte y destino de agentes como pesticidas solubles y otros compuestos químicos.

Por último, y en términos de eficiencia, con las técnicas convencionales de sondeos de suelo, las observaciones por debajo de 2 m de profundidad requieren invertir un tiempo mínimo de 30 minutos para cada una de ellas, mientras que con la utilización del radar se obtiene un perfil continuo hasta una profundidad de 4 m en un transecto de 1600 m en aproximadamente 20 minutos.

REFERENCIAS

- Collins, M.E. (1990). Applications of Ground Penetrating Radar. Actas del XVII Reunión Nacional sobre Edafología, p. 15-32. Badajoz.
- Collins, M.E.; Doolittle, J.A. y Rourke, R.V. (1989). Mapping depth to bedrock on a glaciated landscape using ground penetrating radar. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**, 1806-1812.
- Collins, M.E.; Puckett, W.E.; Schellentrager, G.W. y Yust, N.A. (1990). Using GPR for micro-analyses of soils and karst features on the Chiefland Limestone Plain in Florida. *Geoderma*, **47**, 159-170.
- Doolittle, J.A. (1987). Using ground penetrating radar to increase quality and efficiency of soil surveys. p. 11-32. In W.U. Reybold and G.W. Petersen (ed.) Soil survey techniques. SSSA Special Publ. 20. SSSA, Madison, WI. 98 p.
- Dunn, W.J. (1982). Plant communities of Alachua County, Florida. Unpublished M.S. Thesis, University of Florida, Gainesville, FL.
- López-Piñero, A.; Collins, M.E. y Kuehl, R.

- (1994). Influence of field moisture conditions on GPR interpretations of soil properties. 86st Annual Meeting ASA-CSSA-SSSA. Seattle, Washington.
- Mokma, D.L.; Schaetzl, R.J.; Doolittle, J.A. y Johnson, E.P. (1990). Ground penetrating radar study of ortstein continuity in some Michigan Haploquods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**, 936-938.
- Puckett, W.E. (1990). Soils, landscapes and ground penetrating radar analysis of the Chiefland limestone plain. PhD diss. Univ. of Florida, Gainesville.
- Shih, S.F. y Doolittle, J.A. (1984). Using radar to investigate soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **48**, 651-657.
- Soil Survey Staff. (1975). Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Handb.* **436**. *USDA Soil Cons. Serv.* Washington. 754 p..
- Soil Survey Staff. (1992). Keys to soil taxonomy. 5th. edition. *SMSS Technical Monograph* **19**. Pocahontas Press, Blacksburg, Virginia, USA. 541 p.
-