

Impacto de la geoquímica en la salud: una aproximación basada en estudios de casos de ecosistemas tropicales en la República Dominicana

Impact of geochemistry on health: an approach based on case studies of tropical ecosystems in the Dominican Republic

A.J. HERNÁNDEZ – anaj.hernandez@uah.es (Dpto. de Ecología, Universidad de Alcalá, Madrid, España)

S. ALEXIS – (same address as A.J. Hernández)

C. VIZCAYNO – cvizcayno@ccma.csic.es (Dpto. de Suelos, CCMA, CSIC, Madrid, España)

J. PASTOR – jpastor@ccma.csic.es (Dpto. de Ecología de Sistemas, CCMA, IRN, CSIC, Madrid, España)

RESUMEN: El contenido de metales pesados suelos correspondientes a los bosques tropicales de la Reserva de la Biosfera Jaragua-Bahoruco-Enriquillo de la República Dominicana, nos lleva a situarnos ante la problemática de los mismos y la salud. La hipótesis de que metales producidos por una acción geoquímica en alguno de los agroecosistemas pueda estar relacionada no solo con su productividad, sino también con la salud humana y animal, nos ha conducido a estudiar la biodisponibilidad los mismos en los cultivos que son fuente primaria de alimentación humana y forrajera en la zona.

Respecto al sustrato, las rocas sedimentarias calizas son la litología predominante, aunque coluviones de calizas predominan en el bosque de coníferas y en el nublado, calizas cristalinas en el bosque latifoliado y rocas detríticas y arrecifes del cuaternario en el bosque seco. Los suelos van de superficiales a poco profundos, pedregosos, con escaso desarrollo edafogenético. La mayoría no presenta horizontes pedogenéticos y están sometidos a diversos regímenes de humedad y temperatura, ubicados desde las montañas hasta paisajes asociados a ríos y lagunas o costas arenosas. Las principales arcillas son: hematita, caolín, bohemita, gibsita y calcita. Las texturas van desde arenoso-francas hasta arcillosas. Los pH generalmente básicos. Los contenidos de M.O. y N no son bajos, pero sí los de K asimilable en los bosques de montaña, aunque elevados en el bosque seco. El P asimilable es siempre muy bajo y los metales pesados son generalmente más elevados que los niveles de referencia, especialmente en suelos de cultivo, y por tanto resultan perjudiciales.

Se muestran también los resultados del análisis de las aguas en el territorio en relación a los compuestos inorgánicos y orgánicos que pueden ocasionar problemas de salud, así como los obtenidos en diferentes bioensayos experimentales realizados en microcosmos con suelos representativos y especies cultivadas. La alta conductividad y contenidos de cloruros y sulfatos, además de Al y Fe en el agua de pozos, indican que procesos geoquímicos pueden estar implicados con la salubridad de las aguas para cultivos y ganado. Así mismo, el Cu en los frutos de habichuela es más elevado que los valores de referencia para este metal en suelos. Existen diferencias en cuanto a los contenidos de metales en las hojas de todos los cultivos (habichuelas, guandules, maíz y sorgo). La discusión de los resultados se hace desde una perspectiva de las ecopatologías que producen los metales pesados y que afectan a la salud de los agroecosistemas y a la salud animal y humana.

PALABRAS CLAVE: reserva de la biosfera, suelos forestales, metales litogénicos, composición aguas, ecopatologías.

ABSTRACT: Prompted by the high heavy metal levels frequently encountered in topsoil samples of the tropical forests of the Jaragua-Bahoruco-Enriquillo Biosphere Reserve, Dominican Republic, and considering the most common land uses of this area, we decided to address this pollution problem and its effects on health. The source of these pollutants is linked to geodaphic processes more than to human impacts, in a region that comprises core, intensive agriculture and buffer areas of the reserve, harbouring mines (bauxite and limestone), crops and livestock. The hypothesis that heavy metals liberated by geochemical actions in some of these tropical ecosystems could be related both to productivity and to human and animal health, led us to assess metal bioavailability in the area's main crops as the primary source of food or fodder.

*This study presents an experimental design in which microcosms were set up using soils selected according to the known presence of several metals (Cd, Cr, Cu, Zn, Ni and Al) and seeds obtained from the original crops in the area: kidney beans (*Phaseolus vulgaris*), the legume "guandules" (pigeon pea *Cajanus cajan*), corn (*Zea mays*) and sorghum (*Sorghum bicolor*). These crops are consumed by humans, herbivores (goats mainly and cows) and other animals (e.g. hens and pigs); crop remains are even used as organic fertilizer. The complex trophic network that includes heavy metals generated by geochemical actions in these tropical ecosystems makes them real scenarios for studies on relations between environmental health and human health.*

To establish the context of the heavy metal pollution, we characterized the geodaphic features of the region. The predominant rocks are sedimentary limestones: with limestone colluvial deposits dominant in the tropical conifer forest and rain forest of the Sierra de Bahoruco; crystalline limestones in the tropical latifoliated forest; and Quaternary detritic rocks and reefs (carbonates overlying alterites) in the dry tropical forest. Across the territory, there is a marked predominance of soils that range from surface soils to shallow, poorly developed stony soils of low natural fertility. Most can be classified as entisols. Soils of recent alluvial origin lack pedogenetic horizons and are subjected to diverse humidity and temperature regimens. Slopes are pronounced and relief and altitudes vary. Their profiles include A-R horizons characterised by displaying an ochre epipedon over a fractured rock bed whose depth is shallow, and A-C horizons of a sandy to clayey soil and subsoil texture, whose colours range from dark brown to grey and depths from very shallow to deep. Soils occur from the mountains to landscapes including rivers or sandy coasts. The main types of clay are: hematite, kaolin, bohemite (the most abundant) gibbsite and calcite. Textures range from sandy-silty to clayey. Sand and clay fractions seem more abundant than silt ones. Soil pHs are generally in the basic range with infrequent acid soils. Organic matter and total nitrogen levels are not low, especially OM in the dry forest and N in the latifoliated forest. Available K contents are low in mountain forests and high in dry forests. Available P contents are generally low to very low.

The heavy metals in the soils are mainly of lithogenic origin and levels are generally higher than those of the reference soils mentioned in the bibliography (established polluted soils that could harm the plants they sustain). Specifically, Ni, Cu and especially Cd, were markedly high in crop soils.

The chemical health state of the area's waters was also examined. In terrestrial ecosystems with the exception of one, pHs were basic. Highest electrical conductivity values were recorded in wells. Carbonates and bicarbonates showed scarce variation. In inland ecosystems, most marked anion contents were those of chlorides and sulphates detected in ponds, which also showed high levels of Mg and Na. One of these wells found at a bauxite mine is used as a drinking trough by livestock and wild animals and also contains elevated Al and Fe. In coastal ecosystems, waters exhibit extremely high sulphate and especially chloride concentrations. Finally, existing organic compounds are those frequently found and pose no harm.

Although this is a preliminary approach to the topic, we present our initial results in terms of the heavy metal contents of the above-ground plant mass (essentially the leaves and seeds as the main parts consumed). The results of our bioassays on the four main crops of the area indicate significant differences in the heavy metal contents of kidney beans depending on the soils. The Cu contents of the beans in all the soils were higher than reference values, while Zn and Mn levels surpassed these references in one of the soils. There was no detectable presence of harmful metals such as Cd and Cr, and Ni, concentrations were low. Leaf metal contents of the kidney bean also varied according to the soil they grew in with the exception of Al, which always appeared in high levels. Cd was absent in leaves; Mn and Cu concentrations were high while those of Zn, Cr and Ni were low. Appreciable levels of Cu, Ni,

Cd, As and Cr were also found in different tissues of the leaves of pigeon peas. We also provide the results of an electron microscopy study designed to identify the plant organs capable of accumulating most heavy metals. Thus, the leaves of sorghum showed high proportions at the cell level of Cu, Ni and Cr along with the presence of Cd. In corn leaf cells growing in the soils of the bauxite mine, Cu levels were high followed by Ni, and Cd concentrations were sufficiently high to be taken into account. Moreover, small quantities of As should also be considered. Finally, we discuss our results from the perspective of the possible ecopathologies produced by heavy metals in the topsoil that could affect the health of agroecosystems, animals and humans.

KEYWORDS: biosphere reserve, forest soils, lithogenic metals, water composition, ecopathologies.

1. INTRODUCCIÓN: MARCO CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE TRABAJO

Se parte del presupuesto de que la salud de ecosistemas es uno de los pilares en que se apoya el desarrollo sostenible, por lo que comienza a ser un nuevo lenguaje para el discurso público de la contaminación, (Hernández y Pastor, 2007). Así, la salud de ecosistemas se ha definido como una ciencia emergente de aproximación sistémica para prevenir, diagnosticar y pronosticar aspectos para el manejo de los mismos y establecer relaciones entre la salud del ecosistema y la salud humana (Calow, 1995; Di Guilio y Monosson, 1996; Rapport, 2003). Hace ya treinta años se iniciaba la investigación de geoquímica y salud como una de las líneas del Programa MAB (Man and Biosphere) de la Unesco (1978).

El contenido de metales pesados en la capa superficial de suelos correspondientes a los bosques tropicales presentes en la Reserva de la Biosfera Jaragua-Bahoruco-Enriquillo de la República Dominicana, y de sus usos más frecuentes (Hernández et al., 2007), nos ha llevado a situarnos ante la problemática de los mismos y la salud. El origen de estos contaminantes está vinculado esencialmente a procesos geoedáficos más que a impactos antrópicos, en un territorio que alberga tanto áreas núcleo, como de agricultura intensiva y de amortiguamiento de dicha Reserva, y en las que se sitúan explotaciones mineras (bauxita y caliza), agrícolas y ganaderas. La hipótesis de que metales pesados producidos por una acción geoquímica en algunos de estos ecosistemas tropicales pueda estar relacionada no solo con la productividad del sistema, sino también con la salud humana, nos ha conducido a estudiar la biodisponibilidad por parte de los principales cultivos que son fuente primaria de la alimentación humana y forrajera en dicho territorio. Pero este estudio no desea quedarse en las respuestas de las plantas a los metales pesados, sino en aproximarnos a las denominadas ecopatologías que pueden producir los mismos (Pérez, 2001). En la actualidad ha comenzado a denunciarse la existencia de una “pandemia silenciosa” debida a tóxicos ambientales, cuyo efecto en las personas es real aunque difícil de calibrar (Ortega et al. (2005). No obstante, el reciente estudio de la OMS en 2006, el que ha puesto de manifiesto la relación de muchas patologías atribuibles al medio ambiente (Prüss et Corvalán, 2006).

Sin embargo, sigue siendo muy escasa la información acerca de de la morbilidad y la mortandad de animales que se alimentan de plantas con altos niveles de metales tóxicos en algunas de sus partes comestibles. Es por ello que este trabajo desea aproximarse también a este aspecto. En el citado informe de la OMS, se señala que la carga de morbilidad causada por factores ambientales es mucho más elevada en el mundo en desarrollo que en los países desarrollados, a excepción de determinadas enfermedades cardiovasculares y los cánceres. Esta problemática está especialmente relacionada con las aguas poco o nada salubres, pero no encontramos referencias claras en cuanto a su relación a suelos contaminados.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Las características del área de estudio y el análisis de casi 70 muestras de la capa superficial de los suelos de los bosques tropicales que mayor extensión ocupan en la única Reserva de la Biosfera de la República Dominicana se muestran en Hernández et al. (2005 y 2007). Atendiendo a los valores obtenidos para los metales pesados, se han elegido cuatro escenarios reales en base a la presencia de más de un metal pesado en la capa superficial edáfica y que son representativos de los usos más frecuentes en las áreas de agricultura intensiva, de amortiguamiento y núcleo de esta reserva de la biosfera. Las muestras de suelo recogidas en esos escenarios sirvieron para realizar bioensayos en microcosmos (cubetas con 1 Kg. de suelo) en condiciones controladas (Tª, humedad y horas de luz acordes a las condiciones tropicales), donde se sembraron cuatro tipos de cultivos mayoritarios en la zona, con variedades locales (las semillas fueron previamente germinadas en cámaras de crecimiento manteniéndolas en la oscuridad hasta su germinación y luego se traspasaban a las cubetas). Los cuatro escenarios utilizados en los ensayos para cada uno de los cultivos se corresponden a cuatro tratamientos en términos estadísticos, para ver las respuestas de las plantas al crecer con diferentes contenidos de metales en los suelos. Tres replicaciones por tratamiento y control. El suelo utilizado en los microcosmos de este último es también un suelo agrícola carbonatado y con Al, siendo en esos factores semejante a los de los cuatro escenarios, pero sin metales pesados.

Las cuatro especies cultivadas son dos leguminosas (habichuelas *-Phaseolus vulgaris-* y guandules *-Cajanus cajan-*) y dos gramíneas, (maíz *-Zea mays-* y sorgo *-Sorghum bicolor-*). Ambas constituyen alimento primario para las poblaciones humanas, además de ser forrajeras (especialmente el sorgo y el maíz) para ganado caprino y vacuno o utilizarse como complementos en las dietas alimenticias de las cabras (Tablas 1 y 2) Incluso, las partes no comestibles por las personas se utilizan para alimentación de animales domésticos (cerdos y gallinas) y como abono orgánico para los suelos de cultivo.

Cultivo	1999		2000	
	Siembra (Ha)	Producción (Tn)	Siembra (Ha)	Producción (Tn)
Habichuelas	1045	1368	1393	1404
Guandules	813	2373	559	2917
Maíz	284	619	430	494
Sorgo	189	867	538	337

Tabla 1 – Evolución de los principales cultivos según datos recientes.

Table 1 – Recent production data for the main crops.

Cabritos en desarrollo Cabritas de reemplazo (mayor aporte de proteína)	Sementales, Hembras lactantes y preñadas en el último tercio de la gestación (mayor aporte de energía)
Forraje de guandules y forraje de habichuelas (pastos en lomas) y además de sorgo en pastos llanos)	Subproductos de yuca, batata y otros cultivos + Forraje de maíz.

Tabla 2 – Utilización más frecuente de especies para suplemento en las dietas alimenticias del ganado caprino en el territorio de estudio (fuente: Rodríguez Goñi, 2002).

Table 2 – Species most commonly used to supplement the diets of goats reared in the study area (from Rodríguez Goñi, 2002).

Los niveles de elementos asimilables son analizados según Lakanen & Ervio, (1971), y mediante espectrofotometría de emisión de plasma, tras moler los suelos en mortero de ágata y someterlos a ataque ácido con HNO₃ y HClO₄ en proporción 4:1, en el caso de los contenidos totales. Para el resto de parámetros analíticos se siguen las técnicas expuestas en Hernández y Pastor (1989). Además, se ha utilizado la técnica de microscopía electrónica de barrido para saber qué órganos y tejidos vegetales podían acumular metales y en qué cantidades. Se ha efectuado un análisis de la varianza para los resultados procedentes de los bioensayos y se muestra el grado de significación estadística F (***) con un nivel del 99,9%, ** del 99%, *, del 95% y F (fiable) del 90%.

3. RESULTADOS

3.1 Características del sustrato y de los suelos relacionadas con los metales

Las rocas sedimentarias calizas es la litología predominante, aunque podemos decir que los coluviones de calizas son las predominantes en el bosque tropical de coníferas (Bc) y bosque nublado (Bn) de la Sierra de Bahoruco; las calizas cristalinas en el bosque tropical latifoliado (Bl) y las rocas detríticas y arrecifes del cuaternario (carbonatadas sobre alteritas) en el bosque tropical seco (Bs). Exponemos a continuación aquellos resultados que pueden permitir observar las relaciones geoquímicas en este ambiente tropical vinculadas a la salud, tanto de los agroecosistemas del territorio, como a la de los animales por el consumo de forraje y bebida de aguas retenidas en los mismos durante los meses de lluvias.

En la Tabla 3 se muestran tres parámetros edáficos: pH, M.O. y arcilla, relacionados con la disponibilidad de los metales pesados en los suelos. Y en la tabla 4, se pueden apreciar los tipos de arcilla y sus porcentajes en los mismos.

Suelos	pH	M.O.	Arcilla
Bc	7,6	5,1	18
Bn	7,0	4,8	66
Bl	6,5	3,9	26
Bs	7,5	7,2	29

Tabla 3 – Valores medios del pH, materia orgánica y arcilla (%) de los suelos de los bosques tropicales de la Reserva.

Table 3 – Mean soil pH, organic matter and clay (%) values for the reserve's tropical forests.

Suelo	caolín	hematita	gibsita	bohemia	calcita
Bc	20	42	14	24	-
Bl	14	40	16	30	-
Bs	5	15	-	15	65

Tabla 4 – Tipos de arcilla y porcentajes medios en suelos deforestados de los bosques utilizados para los ensayos en microcosmos.

Table 4 – Clay types and their mean percentages recorded in the deforested soils used in the microcosm assays.

Hematita, bohemia y caolín están presentes en los suelos de los tres tipos de bosque, que ahora mantienen diversos cultivos, mientras que la gibsita se encuentra en el bosque latifoliado

y en el de coníferas y la calcita se haya en el bosque seco. Los valores medios más elevados son los de calcita y bohemia.

3.2 Composición de las aguas

En la Tabla 5, puede verse que, excepto uno, los pH de las aguas analizadas son básicos. La conductividad eléctrica más elevada se encuentra en los pozos, a excepción de la registrada en humedales y laguna salada. En los valores de carbonatos y bicarbonatos no existen importantes variaciones entre las muestras.

nº	Muestras de Agua	pH	C.E.	CO ₃	HCO ₄
Rio Pedernales					
1	Cuenca Alta	8,11	292	13,0	106,0
2	Cuenca Media	7,96	282	0,0	198,7
3	Cuenca Baja	7,52	177	0,0	119,2
4	Agua potabilizada	8,12	259	19,5	66,2
Canales de riego					
5	Cuenca baja (agric.ultura intensiva)	7,90	244	0,0	172,2
6	Cuenca baja (agricultura)	7,31	273	0,0	185,5
7	(agricultura intensiva)	8,26	232	26,1	72,9
Pozos					
8	Poza en Pasto	8,10	458	13,0	198,7
9	Pozo	7,95	668	0,0	225,2
Lagunas y Humedales costeros					
10	Laguna de Oviedo	7,64	61900	0,0	225,2
11	Humedal del Cabo Rojo	6,90	47500	0,0	225,2

Tabla 5 – pH, Conductividad eléctrica y contenidos de carbonatos y bicarbonatos en aguas.
 Table 5 – pH, electrical conductivities (C.E. $\mu\text{S/cm}$), and carbonates and bicarbonates contents (mg/l) in waters.

La concentración de aniones existentes en las aguas se observa en al Tabla 6. Al igual que vimos en la tabla anterior, en las muestras de aguas de los ecosistemas del interior, los contenidos mas notables que encontramos son los de cloruros y sulfatos hallados en pozos y, lógicamente en lagunas y humedales.

En la Tabla 7, siguen destacando los contenidos elevados de Mg y Na en los pozos, y en uno de ellos, situado en un entorno de explotación de bauxita, que actúa como bebedero de ganado y fauna silvestre, además son elevados los contenidos de Al y Fe.

Los compuestos orgánicos existentes en las muestras de aguas recolectadas (Tabla 8) son comunes y frecuentes y su presencia no indica la existencia de ningún tipo de peligrosidad en las mismas.

nº	Muestras de Agua	F	Cl	NO ₂	NO ₃	PO ₄	SO ₄
Río Pedernales							
1	Cuenca Alta	0,13	7,29	0,25	5,14	0,0	1,32
2	Cuenca Media	0,15	3,37	0,16	4,4	1,23	1,48
3	Cuenca Baja	0,16	4,08	0,23	1,52	0,0	1,18
4	Agua potabilizada	0,15	4,79	0,25	6,2	0,0	2,04
Canales de riego							
5	Cuenca baja (agricultura Intensiva)	0,15	3,51	0,19	3,0	0,0	2,01
6	Cuenca baja (agricultura)	0,14	7,43	4,81	0,45	0,0	2,69
7	(agricultura intensiva)	0,17	7,38	0,35	1,41	0,0	2,47
Pozos							
8	Pozo en pasto	0,13	60,22	0	0,46	0,0	11,61
9	Pozo	0,13	27,18	0	3,31	0,0	5,65
Lagunas y Humedales costeros							
10	Laguna de Oviedo	0,0	30025,0	0,48	0,34	0,0	4888,5
11	Humedal del Cabo Rojo	0,0	24875,0	0,38	0,38	0,0	3996,5

Tabla 6 – Concentraciones (mg/l) de aniones en las aguas.

Table 6 – Water anion concentrations (mg/l).

Nº	Muestras de Agua	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn
Río Pedernales								
1	Cuenca Alta	63,0	0,2	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0
2	Cuenca Media	62,8	0,8	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0
3	Cuenca Baja	34,5	0,7	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0
4	Agua potabilizada	56,6	0,9	0,0	2,4	0,0	0,0	0,0
Canales de riego								
5	Cuenca baja (agricultura Intensiva)	53,4	1,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
6	Cuenca baja (agricultura)	56,9	1,0	0,3	6,0	0,0	0,0	0,0
7	(agricultura intensiva)	40,7	2,5	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0
Pozos								
8	Pozo en pasto	37,1	8,7	38,6	21,1	0,7	1486,0	1,1
9	Pozo	83,4	10,0	3,0	65,6	0,0	0,0	0,0
Lagunas y Humedales costeros								
10	Laguna de Oviedo	998,7	2594,3	835,0	16847,0	0,0	0,0	0,0
11	Humedal del Cabo Rojo	1038,3	2153,5	643,4	11607,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 7 – Concentraciones (mg/l) de cationes en las aguas.

Table 7 – Water cation concentrations (mg/l).

Río Pedernales		Canales de riego	Poza de pasto	Oviedo (Laguna)	Cabo Rojo (Humedal)
Cuenca alta	Cuenca baja				
Ácido nonanoico	Diisobutil ftalato	Dietil ftalato	Diisobutil ftalato	Ácido nonanoico n-hexil isobutirato	Eicosano
2,4-diterbutilfenol	Dibutil ftalato	Diisobutil ftalato	Eicosano		Tetracosano
Dibutil ftalato	Hexacosano	Dibutil ftalato	Tetracosano	Diisobutil ftalato	Diocil adipato
n-Tetracosano	Diocil adipato	Ácido hexadecanoico	Diocil adipato	Eicosano	Hexatriacontano
Diocil adipato	Diocil ftalato	Ácido oleico	Hexatriacontano	Tetracosano	Diocil ftalato
10-Metilnonadecano	Escualeno	Ácido esteárico	Diocil ftalato	Diocil adipato	Escualeno
Diocil ftalato		Diocil ftalato		Diocil ftalato	
Escualeno		Escualeno			
		Colestadieno			

Tabla 8 – Compuestos orgánicos en las aguas.
Table 8 – Organic compounds in waters.

3.3 Resultados de los bioensayos experimentales

En la Tabla 9 pueden observarse los contenidos de Al cambiante y de metales pesados pseudototales, correspondientes a cuatro suelos utilizados, representativos de tres de los principales tipos de bosque de esta reserva de la biosfera, en sus zonas dedicadas a usos agrícolas y que fueron depositados en los microcosmos. En ellos se sembraron las dos especies de leguminosas estudiadas, habichuelas (*Phaseolus vulgaris*) y guandules (*Cajanus cajan*) y los dos cereales, maíz (*Zea mays*) y sorgo (*Sorghum bicolor*).

Suelo	Al*	Cd	Cr	Cu	Zn	Ni
Bs 1	44	8,4	68,7	72	139	89,9
Bs 2	nd	37	171	259	148	180
Bl	685	28,8	103	259	504	234,5
Bc	168	42,6	50,6	165	121	165,6
Nivel ref.		0.8	100	36	140	35

*método de Lakanen y Ervio;

nd: no determinado

Tabla 9 – Compuestos orgánicos en las aguas.
Table 9 – Organic compounds in waters.

Pueden verse también los niveles de referencia de los metales que corresponden a la normativa europea, por encima de los cuales puede haber contaminación en los suelos (<http://edafología.ugr.es/conta/tema15/riesgos.htm>).

Los contenidos de metales pesados, si bien en este caso son de origen litogénico, fueron generalmente más elevados que los niveles de referencia utilizados en la bibliografía, como correspondientes a suelos con contaminación demostrable y por tanto que pueden perjudicar a los organismos que en ellos crecen. Concretamente el Ni, Cu y especialmente el Cd, fueron notablemente elevados en los cuatro suelos de cultivo. Así el contenido de Ni se acercó en uno de los suelos a 235 ppm, el Cu a 255 ppm y el Cd a 43 ppm. De los restantes metales, pesados, el Cr alcanzó los 171 ppm y el Zn, 504 ppm. Finalmente el contenido de Al, no el pseudototal sino el disponible, alcanzó los 685 ppm.

En las Tablas 10 a 14 se muestran los resultados obtenidos en los bioensayos experimentales con los cuatro cultivos mayoritarios, en cuanto a los niveles de metales pesados en las partes aéreas de los mismos. Se observa, (Tabla 10) que, al estudiar los contenidos de metales en los frutos de habichuela, existen diferencias significativas, cuando éstas crecen en los diferentes suelos. Los contenidos de Cu en los frutos son más elevados que los valores de referencia en todos los suelos estudiados. Los contenidos de Zn y Mn superan dichos valores si el cultivo se sitúa en el bosque de coníferas. No hay presencia detectable de otros metales dañinos como el Cd; los valores de Cr y Ni, tampoco son elevados y no se recogen en la tabla.

Suelo	Fe	Mn	Zn	Cu	Al
Control	80,3±11,2	24,1±4,3	18,5±4,1	8,5±2,2	35,4±9,0
Bl	82,9±9,5	26,6±5,8	27,8±3,7	7,6±1,0	10,1±6,8
Bs 1	68,5±15,9	18,3±1,7	27,8±4,9	12,4±5,8	13,7±13,5
Bs 2	59,9±8,1	21,4±0,8	26,0±5,3	10,3±0,8	8,0±2,4
Bc	93,0±12,5	52,3±13,4	92,2±62,6	72,6±90,0	30,117,8
F	3,219*	14,969***	6,827**	4,470*	2,869 ^F
WHO ref. (foods)	n.d.	< 32,5	<45,0	< 2,90	n.d.

Tabla 10 – Niveles de metales (ppm) en frutos de habichuelas locales (*Phaseolus vulgaris*) cuando crecen en los suelos de los microcosmos.

Table 10 – Heavy metal contents (ppm) of the fruits of local kidney beans (Phaseolus vulgaris) growing in the microcosm soils.

Existen también diferencias significativas en los contenidos de algunos de los metales de las hojas de las habichuelas, (Tabla 11), cuando crecen en los diferentes suelos, excepto para el Al, cuyo contenido es muy elevado, así como el del Fe, Mn y Cu son también altos, mientras que son bajos los valores de Zn, Cr y Ni., y no hay presencia de Cd.

Suelo	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Al
Control	603,5±278,5	385,0±69,4	5,7±2,5	32,3±4,6	0,0±0,0	2,5±3,8	915,3±506,7
Bl	1474,3±1628,5	312,3±82,8	20,5±9,4	35,3±6,0	4,9±9,2	2,5±5,5	2152,2±2404,1
Bs 1	980,7±1031,1	358,3±125,3	29,913,2	30,4±9,1	2,7±5,3	1,9±2,7	1392,3±1582,5
Bs 2	895,6±672,9	399,9±72,1	30,5±7,4	43,7±8,4	4,1±6,9	2,5±3,0	1309,7±1079,2
Bc	1145,3±987,7	557,4±125,6	11,2±3,8	33,5±4,9	3,7±4,9	3,1±4,5	1890,3±1823,6
F	0,632	7,352***	13,462***	4,052**	1,562	0,221	0,602
WHO ref.	n.d	< 32,5	< 2,90	<45,0	< 30,0	< 9,80	n.d.

Tabla 11 – Niveles de metales (ppm) en frutos de habichuelas locales (*Phaseolus vulgaris*) cuando crecen en los suelos de los microcosmos.

Table 11 – Heavy metal contents (ppm) of the fruits of local kidney beans (Phaseolus vulgaris) growing in the microcosm soils.

Sin embargo, en las hojas de sorgo (Tabla 12), pudimos observar que a nivel celular, los porcentajes de Cu, Ni y Cr son elevados y también hay presencia de Cd.

En la Tabla 13, vemos lo que ocurre en células de hojas del maíz cuando crece en los suelos del entorno donde se encuentran explotaciones de bauxita. Existencia en las hojas de contenidos elevados de Cu, seguidos de Ni. aunque los niveles de Zn son bastante discretos. Pero en este caso, los contenidos de Cd son suficientemente elevados como para ser tenidos en cuenta y también existen pequeñas cantidades de As a considerar. El Pb no aparece en ningún caso. El Al

únicamente puede observarse en las células del haz, pero no en las del envés ni en los vasos conductores. Los contenidos de K y Ca son muy similares en las células del haz y en las del envés. El K es muy elevado en las células de los vasos conductores.

Metal	Bs 1			Vaso	Bc
	Célula				Célula
	externa	media	interna		epidermis
Cr	9,1	8,8	9,6	8,5	9,0
Fe	31,5	37,7	32,0	36,0	35,3
Ni	11,1	12,1	9,2	13,0	21,9
Cu	19,5	15,4	16,7	19,3	22,0
Zn	n.d.	6,4	2,5	2,7	n.d.
Cd	n.d.	0,34	n.d.	3,7	0,86

n.d.: no detectado

Tabla 12 – Variación en el contenido de metales pesados (%) en células epidérmicas (externas), del mesófilo (media), de la túnica vascular (interna) y vasos conductores en una hoja de sorgo.

Table 12 – Heavy metal contents (%) of cells of the epidermis (outer), mesophyll (middle), vascular tunica (inner) and vessels of a sorghum leaf.

Metales (%)	Epidermis Hoja		Vasos Hoja
	Haz	Envés	
Al	0,09±0,22	n.d.	n.d.
K	29,29±11,73	28,96±3,73	41,54±16,57
Ca	9,28±7,64	8,29±1,39	4,51±2,09
Fe	9,56±2,49	11,94±2,69	12,85±10,18
Ni	12,36±7,34	14,61±1,87	6,79±1,63
Cu	37,52±7,38	23,67±0,49	18,89±10,55
Zn	4,53±4,77	4,61±0,13	7,55±9,55
As	0,69±0,98	1,63±2,31	n.d.
Cd	4,24±3,55	6,32±5,24	2,44±4,88
Pb	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.: no detectado

Tabla 13 – Porcentajes medios del contenido en metales pesados en células de hoja de maíz crecido en el suelo procedente de una escombrera de explotación de bauxita.

Table 13 – Mean heavy metal percentages recorded in the cells of the leaf of a corn plant grown in soil taken from the landfill of a bauxite mine.

Finalmente, en la Tabla 14, vemos lo que sucede en diferentes tejidos de las hojas de guandules, donde también existen niveles apreciables de Cu, Ni, Cd, As y de otros metales dañinos (Cr).

Metal	Epidermis	Parénquima	Vaso	Pelo de Epidermis
Cr	5,9	5,6	6,4	5,1
Fe	22,7	22,9	23,2	20,4
Ni	17,0	14,8	17,3	19,7
Cu	23,8	26,1	22,6	17,1
As	8,4	7,4	2,9	8,3
Cd	2,8	4,0	1,2	7,2

Tabla 14 – Contenidos de metales (%) a nivel celular de diferentes tejidos vegetales en hojas de guandules (*Cajanus cajan*) creciendo en suelo de uso agrícola del bosque seco.

Table 14 – Cell heavy metal contents (%) of the different plant tissues in the leaves of Cajanus cajan grown in soil used for agriculture in the dry forest.

4. DISCUSIÓN

Aunque se trata de suelos básicos y la disponibilidad de los metales pesados, decrece a medida que aumenta el pH, los resultados obtenidos en el análisis de las plantas cultivadas, muestran que cantidades relevantes de los mismos pasan a ellas desde los suelos. Como puede apreciarse, especies de una misma familia botánica, captan de forma desigual los metales. Este resultado es análogo a los que se presentan en Adriano (2001). Además, en el caso de los suelos analizados en estos bosques tropicales, se deberá hacer un seguimiento de los metales pesados concretos que, según los resultados obtenidos, pueden pasar a la cadena trófica, afectando a la salud de los cultivos, a la de los herbívoros y a las poblaciones humanas que de ellos se alimentan (Hapke, 1986).

Resaltamos a continuación, algunas de las ecopatologías, siguiendo la terminología empleada por Pérez (2001), que causan los metales que hemos encontrado y que han mostrado mayor relación con la geoquímica de los suelos estudiados.

El Cd nos parece especialmente peligroso en los suelos de la provincia de Pedernales. Este elemento se encuentra en la naturaleza asociado a otros metales, especialmente al Zn, Pb y Cu. Es uno de los tóxicos más peligrosos. A través de las plantas pasa a la cadena alimentaria y es un metal de carácter acumulativo en los organismos. La intoxicación de los vegetales por el Cd genera alteraciones en la función clorofílica (marchitez, necrosis, clorosis en hojas), inhibiendo los procesos de fotosíntesis y la fijación del dióxido de carbono, lo cual conduce a la muerte de las especies a corto plazo (Landis y Min-HoYu, 1991). Hemos detectado que además de ser un elemento de origen litogénico, en las prácticas agrícolas en Pedernales y por la grave carencia de P en los suelos, se usan fertilizantes fosfatados y, aunque se sabe que reducen la disponibilidad de los metales pesados, esto no sucede para el caso del Cd. Así mismo, las plantas toman más este metal cuando el contenido en Zn en los suelos es bajo (Liphadzi & Kirkhan, 2006). Los efectos tóxicos del Cd son mucho más agresivos en el mundo vegetal y en los herbívoros, (cabras y vacas en este territorio), mientras que en los carnívoros no se ha descubierto hasta la fecha ninguna ecopatología causada por éste metal. En la especie humana, puede permanecer en el cuerpo durante mucho tiempo y puede acumularse a partir de muchos años de exposición a bajos niveles. Comer alimentos con contenidos importantes de Cd irrita seriamente el estómago

produciendo vómitos y diarreas, y su acumulación puede ocasionar daños a riñones, pulmones y huesos (Hapke, 1996). Porcentajes altos de ganado caprino en la provincia Pedernales de este territorio, que padecen diarreas en las áreas afectadas por este metal, según el informe de Rodríguez Goñi (2002), quizá pueda estar relacionado con el contenido de Cd que tiene el forraje que consumen en ellas, (ver Tabla 2). En este estudio ya lo hemos encontrado en cantidades peligrosas en algunas células y tejidos, pero estamos empezándolo a encontrar en las muestras de las plantas forrajeras, que estamos analizando actualmente.

Un micronutriente esencial para las plantas es el Cu, del que se conocen bien sus efectos tóxicos en las habas (Hernández et al., 2006) y, en general, en las leguminosas. Son conocidos los daños que se producen en la membrana citoplasmática de las células vegetales y animales debidos al Cu. Este metal junto con el Cd son los más peligrosos entre los existentes en los suelos del territorio. De los otros metales existentes, los componentes hidrosolubles del Cr VI son muy tóxicos. Este metal tiende a acumularse en las raíces de las plantas, pero hay estudios que muestran también efectos tóxicos en el tracto respiratorio (Pichard, 2004), ya que es acumulativo en la cadena trófica. Por otra parte el Ni, que previene de la acumulación de urea en legumbres, puede ser tóxico en niveles a partir de 10 ppm en planta, inhibiendo la división celular de los meristemos y limitando la expansión de las raíces (Liphadzi & Kirkhan, 2006). Sin duda se precisarán nuevos análisis químicos en las plantas cultivadas para aproximarnos mejor a la posible acción del Cr y del Ni, a juzgar por los resultados obtenidos a nivel celular (Tablas 12, 13 y 14).

De otros elementos encontrados, su incidencia en la salud es menor; el Zn es un micronutriente esencial, considerado como no peligroso para el hombre, aunque su toxicidad puede aumentar debido a la presencia de arsénico, plomo y cadmio. A diferencia de otros metales pesados, el Zn suele irse perdiendo a lo largo de la cadena trófica en vez de acumularse. La clorosis inducida por sus efectos tóxicos en planta, hecho que hemos observado especialmente en las especies que crecen en los suelos con bauxita correspondientes al bosque tropical de coníferas en este territorio, puede inducir la deficiencia del Mg o del Fe, nutrientes básicos para todos los organismos. La toxicidad del Mn, se debe a su absorción en suelos con Al y bajo pH (Hernández, 1986 y 1987) y, aunque en este territorio los suelos son básicos, presentan niveles muy altos de Al, por lo que pensamos será necesaria una mayor investigación en relación a la relación de toxicidad de ambos metales.

Entre las causas de mortandad de las cabras jóvenes se ha citado su desnutrición debido a que las madres no dan suficiente leche (Rodríguez Goñi, 2002). Puede ser que haya además alguna relación de este efecto con los oligoelementos que se encuentran en las plantas de su dieta alimenticia. Pero no olvidemos que en el caso de los oligoelementos, tanto la deficiencia como el exceso pueden ocasionar problemas. En este sentido, los altos valores de Fe y Al en aguas, estancadas en ciertos suelos para que beba el ganado (ver Tabla 7), puede ser un grave riesgo para la salud animal.

5. CONCLUSIONES

Se parte del presupuesto de que la salud de ecosistemas es uno de los pilares en que se apoya el desarrollo sostenible, por lo que comienza a ser un nuevo lenguaje para el discurso público de la contaminación. La hipótesis de que metales pesados producidos por una acción geoquímica en algunos ecosistemas tropicales de la República Dominicana, pueda estar relacionada no solo con la productividad del sistema, sino también con la animal y la salud humana, nos ha conducido a estudiar la biodisponibilidad por parte de los cultivos mayoritarios de un territorio que alberga la única Reserva de la Biosfera en dicho país. Los resultados obtenidos en relación a los metales pesados que presentan las partes recolectables de los cultivos, muestran presencia de diferentes

metales, a veces en contenidos perjudiciales. A la luz de lo observado, se realiza una discusión de las patologías que pueden sufrir las plantas que los absorben y las personas y animales que se alimentan de las mismas. Esta cuestión obliga a detectar también los metales en las aguas utilizadas por los animales para beber, así como en el riego de los cultivos.

En relación a los análisis de las aguas, la alta conductividad y los contenidos de cloruros y sulfatos, además de Al y Fe en el agua de pozos, indican que procesos geoquímicos pueden estar implicados con su salubridad tanto para cultivos de regadío como para el ganado. En relación con los contenidos de metales en diferentes partes de las plantas analizadas, existen diferencias en cuanto a los contenidos de metales en las hojas de todos los cultivos (habichuelas, guandules, maíz y sorgo) cuando crecen en estos suelos los niveles de Al son muy elevados, los de Mn y Cu son elevados y los de Zn, Cr y Ni son bajos. No hay presencia de Cd. No obstante, en diferentes tejidos de las hojas de guandules, existen niveles apreciables de Cu, Ni, Cd, As y de Cr. Además, resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido, han confirmado a nivel celular este resultado analítico. También, en células de hojas del maíz, cuando crece en los suelos donde se ha explotado la bauxita, vemos la existencia de contenidos elevados de Cu, seguidos de Ni. Los contenidos de Cd son también suficientemente elevados para ser tenidos en cuenta; también existen pequeñas cantidades de As a considerar

Por otra parte, en los frutos de habichuela, vimos que el Cu es más elevado que los valores de referencia para este metal en suelos. Los contenidos de Zn y Mn superan dichos valores en uno de los suelos. No hay presencia detectable de otros metales dañinos como el Cd. Los valores de Cr y Ni, tampoco son elevados.

Queremos señalar que el Cd nos parece especialmente peligroso en los suelos del territorio estudiado. Hemos detectado que, además de ser un elemento de origen litogénico, en las prácticas agrícolas realizadas, y por la grave carencia de P en los suelos, se usan fertilizantes fosfatados, que si son de baja calidad pueden contener Cd. Asimismo, las plantas toman más este metal cuando el contenido en Zn en los suelos es bajo, como es el caso frecuente. Sus efectos tóxicos son mucho más agresivos en el mundo vegetal y en los hervíboros (cabras y vacas en este territorio). En este estudio ya lo hemos encontrado en cantidades peligrosas en algunas células y tejidos de las plantas cultivadas.

Agradecimientos

Esta investigación está siendo financiada mediante el Proyecto CTM2005-02165/TECNO del Mº de Educación y Ciencia de España y el Programa EIADES de la Comunidad de Madrid.

Referencias

- Adriano, D.C. (2001) – *Trace elements in the terrestrial environment*. Springer-Verlag, Berlín.
- Calow, P. (1995) – Ecosystem Health. A critical análisis of concepts. In: *Evaluating and Monitoring the Health of Large-Scale Ecosystems*. NATO ASI Series, vol. 138, Springer-Verlag, Berlín, 33-41.
- Di Gulio, R.T. & Monosson, E. (1996) – *Interconnections between Human and Ecosystems Health*. Champman & Hill.
- Hapke, H.J. (1986) – Heavy metals transfer in the food chain to humans. In: C. R. Barrueco (ed). *Fertilizers and Enviroment*. Kluwer Academic Publishers, 431-436.
- Hernández, A.J. & Pastor, J. (1989) – Técnicas analíticas para el estudio de la interacción suelo-planta. Henares, *Revista de Geología*, 3, 67-102.

- Hernández A.J, (1986) – Acción del aluminio del suelo sobre los vegetales, microflora y microfauna edáficas. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 9-10, 1369-1388.
- Hernández, A.J. (1987) – Fitogeoquímica de suelos ácidos. *Henares, Revista de Geología*, 1, 43-52.
- Hernández A.J.; Alexis, S. & Pastor, J (2005) – Contribución al estudio de la degradación de los suelos de los bosques tropicales de la provincia de Pedernales (República Dominicana). En: Jiménez Ballesta R.; Álvarez, A. M. (eds.). *Control de la degradación de suelos*, 173-178, Comunidad de Madrid, Madrid.
- Hernández, A.J.; Vizcayno, C., Alexis, S. & Pastor, J. (2006a) – Procesos antropodédaficos frecuentes en la Reserva de la Biosfera Jaragua-Bahoruco-Enriquillo (República Dominicana). En: J. F. Gallardo (ed), *Medioambiente en Iberoamérica*, Visión desde la Física y Química en los albores del s. XXI. Diputación de Badajoz, 223-229.
- Hernández, A.J.; Alexis, S., Fernández-Pascual, M. & Pastor, J. (2006b) – Estudio de la nutrición mineral de *Phaseolus vulgaris* L. en suelos de cultivo que contienen metales pesados. En: Lamsfus, C. (ed.-coord.) *Nutrición mineral. Aspectos fisiológicos, agronómicos y ambientales*. Eds. de la Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 573-580.
- Hernández, A.J. & Pastor, J. (2007) – Ecosystem health and geochemistry: concepts and methods applied to abandoned mine sites. In: *Exploring our Environment*, 23rd International Applied Geochemistry Symposium (IAGS), Oviedo, 219-231.
- Hernández, A.J.; Alexis, S. & Pastor, J. (2007) – Soil degradation in the tropical forests of the Dominican Republic's Pedernales province in relation to heavy metal contents. *Science of Total Environment*, 378, 36-41.
- Landis, W.G. & Yu, M.H. (1999) – *Environmental Toxicology. Impacts of Chemical upon Ecology Systems*. Lewis Publishers. Boca Raton 390 p.
- Lakanen E. & Ervio R. (1971) – A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soils. *Acta Agricultura Fennica*, 123, 223-232.
- Liphadzi, M.S. & Kirkhan, M.B. (2006) – Physiological Effects of Heavy Metals on Plant Growth and Function. In: *Plant-Environment Interactions*. B. Huang (ed.). Taylor and Francis, New York, pp. 243-269.
- Ortega, J.A.; Ferris, J. Cánovas, A. & García Castell, J. (2005) – Neurotóxicos medioambientales (II). Metales: efectos adversos en el sistema nervioso fetal y postnatal. *Acta Pediátrica Española*, 63, 182-192.
- Pérez, F. (2001) – Ecopatologías: influencia en la salud pública y sanidad animal. *Anales de la Real Academia Nacional de Medicina*, 137-170.
- Pichard, A. (coord.) (2004) – *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Crome et ses dérivés*. INERIS, Version N° 2-4.
- Prüss-Üstin, A. & Corvalán, C. (2006) – *Informe de la Organización Mundial de la Salud*, www.who.int/es.
- Rapport, D.J.; Lasley, W.L.; Rolston, D.E.; Nielsen, N.O.; Qualset, C.O. & Damania, A.B. (eds.) (2003) – *Managing for Healthy Ecosystems*. Lewis Publishers, USA.
- Riesgos y Legislación en material de suelos contaminados por metales pesados, <http://edafología.ugr.es/conta/tema15/riesgos.htm>.

Rodríguez Goñi, A. (2002) – *Análisis y alternativas tecnológicas en la crianza caprina en Pedernales*. Documentación ARAUCARIA.

UNESCO (1978) – Boletín del programa MAB “La Naturaleza y sus Recursos”, vol XIV, 1, 14.

Comunicación presentada durante o VI Congreso Ibérico de Geoquímica / XV Semana de Geoquímica, Universidad de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 16-21 de Julio de 2007.

Presented during the VI Congresso Ibérico de Geoquímica / XV Semana de Geoquímica, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 16-21 July 2007.

Recibido en 26-Diciembre-2008 / Received 14 January 2008

Revisto en 18-Febrero-2008 / Revised 18 February 2008

Publicado en 6-Mayo-2008 / Published 6 May 2008