

# EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA PARTICIPACIÓN DE ESPECIES DE MANGLE EN EL CONTROL DE METALES PESADOS EN AGUAS DE PRODUCCIÓN

J. L. GROSSO V.\*, R. RESTREPO, L. E. SÁNCHEZ, D. AVENDAÑO e I. MANTILLA

Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia

---

**S**e sembraron tres especies de mangle en un bajo inundado con aguas de producción, con el propósito de determinar la eficiencia de los manglares como filtros biológicos de control de sales y metales pesados. Los resultados mostraron que al mismo tiempo que se adaptaron fácilmente a condiciones continentales, son excelentes filtros biológicos que controlan salinidad en las aguas y acumulan bario a nivel de estructuras vegetales. Este hecho permitió un repoblamiento y enriquecimiento de diversidad biológica en la zona, que favoreció la reaparición de especies vegetales y animales que habían desaparecido del ecosistema del bajo inundado. Con base en los análisis realizados para determinar la cantidad de cloruros y metales pesados retenidos por el vegetal en cada una de sus partes, se encontró que según la especie, la acumulación se presenta en diferentes partes de la planta y depende de las condiciones climáticas y fisicoquímicas del agua. Por otra parte, se determinó una acumulación de más de 200 gm<sup>-3</sup> de bario en raíz y tallo. La especie *Rizophora mangle* demostró ser la que mayor cantidad de bario retiene y *Avicennia germinans* la que presenta el porcentaje más alto de supervivencia.

Tree species of Mangrove were planted in an oil production flooded water area in order to study their efficiency as biological filters for controlling heavy metals in the water. The results indicate that the plants not only successfully adapted to the continental environment but also serve as excellent biological filters accumulating barium and chromium in their structure. This process allowed for a richer and renewed biological diversity in the area which favored the reappearance of vegetal and animal species that had disappeared from the ecosystem. Based on the quantification of the metals accumulated by plants, it was found that these metals accumulate in different parts of the plant depending on the plant species regardless of the physicochemical characteristic of the water and the weather conditions. The plants accumulated up to 200 gm<sup>-3</sup> of barium in their root and stem. The *Rizophora mangle* species accumulated the greatest amounts of barium and *Avicennia germinans* showed the largest survival rates.

---

**Palabras claves:** manglares, aguas residuales, tratamiento, aguas de producción, metales pesados, humedales.

\*A quien debe ser enviada la correspondencia

## INTRODUCCIÓN

El manglar es uno de los ecosistemas más productivos de la tierra. Cerca de las dos terceras partes de las especies de peces, tanto de mar como de agua dulce, dependen de éste. Son bosques halófitos que se desarrollan a lo largo de las costas y estuarios de la zona tropical y subtropical. En sus raíces se desarrolla infinidad de fauna y flora acuática y su follaje es área de alimentación y refugio de innumerables especies volviéndose un banco genético tropical (García, 1994). Estas plantas han desarrollado una serie de adaptaciones fisiológicas y morfológicas que las han hecho las más exitosas a nivel de costa, permitiéndoles colonizar áreas hostiles donde otras especies son incapaces de sobrevivir (Snedaker y Getter, 1985).

El manglar desarrolla un tipo especial de raíces que estabilizan los suelos protegiéndolos de la erosión (Carlton, 1974) y depurándolos de sustancias tóxicas (Silva *et al.*, 1990), haciendo que sean pioneras en la recuperación y que favorezcan posteriormente la recolonización.

La estrategia de reproducción del manglar consiste en que dentro de la planta «madre» germinan las semillas hasta convertirse en plántulas (reproducción vivípara), las cuales son distribuidas en gran cantidad cuando las condiciones ambientales son las apropiadas (época de lluvias); asegurando la renovación y mantenimiento del bosque (Olaya *et al.*, 1987).

Las aguas generadas de los procesos de extracción del petróleo reciben el nombre de aguas de producción. El control de estas aguas posee una marcada relevancia debido al impacto que causan al medio cuando son vertidas. Existen numerosas técnicas de tratamiento; sin embargo, se puede afirmar que dichas metodologías son costosas y, en la mayoría de los casos, requieren una infraestructura compleja para su aplicación.

Aunque no se registran experiencias relacionadas directamente con el control de metales pesados como el bario en aguas de producción de petróleo utilizando manglar, existen investigaciones que dan el soporte científico en los estudios realizados por Lacerda *et al.* (1985a, 1985b, 1987). Encuentran que *R. mangle* es un filtro biológico de algunos metales pesados provenientes de la industria metalúrgica (Mn, Fe, Zn, Cu, Pb, y Cd), los cuales, en más de un 99%, son quelados principalmente en el sedimento y el resto es fijado en

los tejidos no perennes y de características leñosas como raíces y tallos.

A partir de la capacidad del manglar para atrapar metales pesados a nivel de sedimento (Silva *et al.*, 1990), se realizó un piloto mediante su siembra en áreas afectadas por aguas de producción de petróleo, con el objetivo de evaluarlas como filtros biológicos. Se escogieron las especies *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*. La utilización de manglar como filtro biológico es una innovación en el campo industrial para el control y mejoramiento ambiental, convirtiéndose en la alternativa biológica que ofrece la naturaleza.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

### Area geográfica

Este trabajo se realizó en el Distrito de Producción El Centro, campo de producción El Llanito, municipio de Barrancabermeja, departamento de Santander. Se encuentra localizado en la margen oriental del río Magdalena, a los 70° 4' latitud norte y 73° 52' de longitud oeste de Greenwich (IGAC, 1980). Su altitud es de 75 m.s.n.m., tiene una temperatura media de 303 K, y una pluviosidad de 2.000 a 3.000 mm al año distribuida en meses húmedos de abril a noviembre ( $P > 120$  mm), y meses secos de febrero a marzo ( $60 \text{ mm} < P < 120$  mm). La evapotranspiración potencial anual es de 1.800 a 1.900 mm (IGAC, 1975).

### Area experimental.

Es un bajo inundable donde se vierten las aguas de producción, de la subestación Nororiental de El Llanito, Distrito de Producción El Centro. El área experimental se dividió en cuatro zonas de siembra de acuerdo con las características físicas observadas:

Zona 1: Terreno inclinado, con lavado permanente de aguas de producción, alto contenido de material en suspensión, compacto con piedras. Zona 2: Terreno alimentado por dos fuentes de agua salada, el drenaje y la entrada de infiltración de las piscinas, de predominancia arcillosa. Zona 3: Terreno plano con mayor tiempo de retención de aguas y mayor inundación, suelo blando y olor característico a ácido sulfhídrico. Zona 4: Terreno de consistencia gredosa alimentado por dos fuentes de agua: infiltración de las piscinas de retención y una fuente de agua salobre de un drenaje natural (Figura 1).

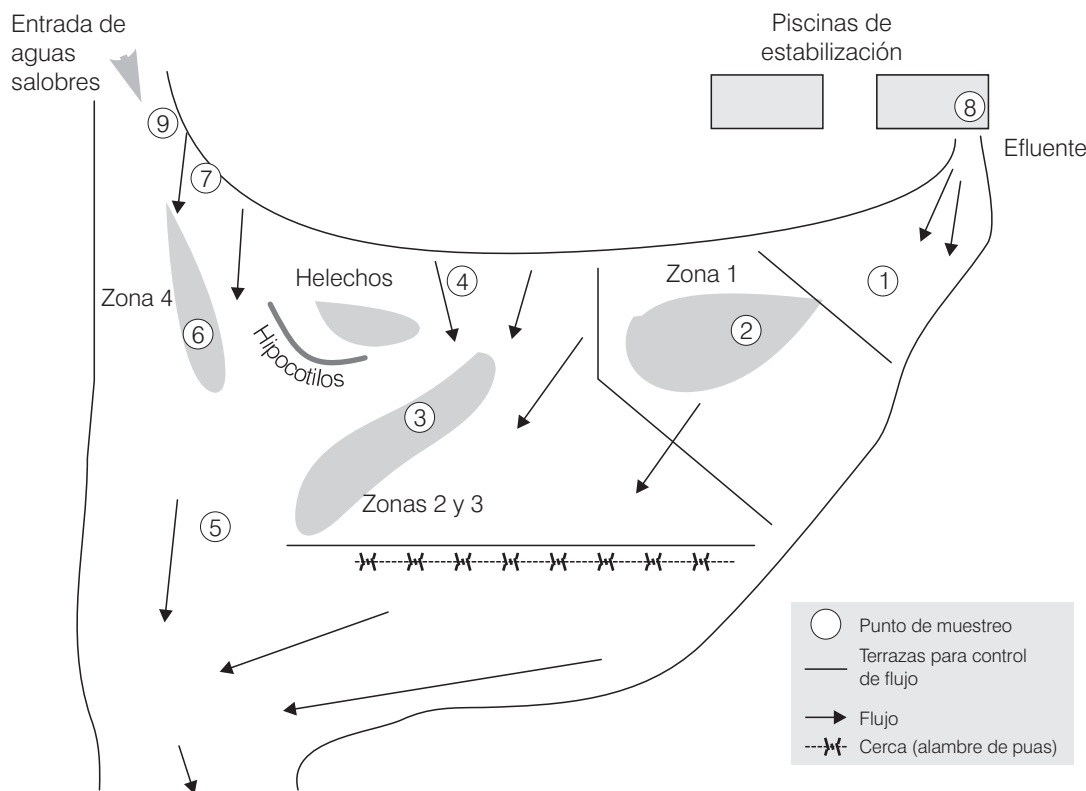


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo, zonas de siembra y flujo en el área de experimentación.

Al inicio del experimento las cuatro zonas no presentan ningún tipo de cubierta vegetal. La vegetación del lugar sólo se desarrolla en aquellas zonas donde el agua de producción no tiene un influencia marcada.

El bajo drena finalmente a la Ciénaga El Llanito, posee una dinámica de inundación en épocas de lluvias que alcanza a llegar hasta el área experimental; y en épocas de sequía, el drenaje del bajo es permanente sobre las aguas de la ciénaga.

### Fase de campo.

Para la ejecución del trabajo de campo, se consiguieron un total de 1.500 plántulas (500 de cada especie) del medio natural, se siguió la metodología de Pulver (1976), protegiéndoles la bola de raíz con una fibra biodegradable durante su transporte y siembra. Para la caracterización y adecuación del área experimental se tomaron muestras iniciales de agua y suelos en diferentes puntos del bajo. Como adecuación se realizó una limpieza de escombros y un ablandamiento superficial del terreno. No se agregó ningún tipo de fertili-

zante a las diferentes zonas. La siembra se realizó en las zonas descritas del área experimental, siguiendo los patrones de distribución dados en el medio natural. Las plantas se dejaron por un mes en fase de preadaptación, a partir de la cual se inicia la toma de los datos.

El lapso entre cada muestreo fue de tres meses, buscando monitorear en épocas climáticas definidas así: M1: Verano (enero - febrero), M3: Invierno (abril - mayo), M6: Invierno (agosto) y M10: Transición de finales de invierno e inicio del verano (noviembre), para un tiempo total de evaluación de 12 meses. Se realizó muestreo a cada una de las plantas, recolectándose datos biológicos como medición de talla; conteo del número de hojas y ramas, entre otros. Así mismo, se midió el contenido de bario en las diferentes partes de las plantas. Para evaluar las condiciones fisicoquímicas del terreno, se midieron los parámetros de pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, cloruros y bario en agua; y para suelos, pH, cloruros, carbono orgánico total (COT) y bario, utilizando las metodologías del "Standard Methods" (APHA, 1992).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### Aguas.

Durante el período de observación la temperatura media del agua fue de 308 K. En la Tabla 1 se presentan los valores fisicoquímicos en agua en rangos de variación, consignando el menor y mayor valor obtenido para cada parámetro durante todo el tiempo de experimentación. El manglar se desarrolló en aguas con pH ácidos (3,8 a 6,8), niveles de oxígeno de 1 a 5,9 gm<sup>-3</sup>, contenido de cloruros hasta de 30.000 gm<sup>-3</sup> y contenido de bario hasta de 57 gm<sup>-3</sup> (Tabla 1). Las zonas de siembra recibieron aportes de aguas de producción del drenaje principal (punto 1) y de filtraciones de las piscinas de separación (puntos 4 y 7).

Se determinaron tres recorridos de las aguas de producción, siguiendo los patrones de flujo presentados en la Figura 1:

1. Piscina principal (punto 1), zona 1 de siembra (punto 2), salida del bajo (punto 5).
2. Infiltración piscina 1 (punto 4), zona de siembra 2 y 3 (punto 3), salida del bajo (punto 5).
3. Punto de filtración (7), zona de siembra 4 (punto 6), salida del bajo (punto 5).

Los resultados fisicoquímicos muestran una similitud entre las aguas de la salida de la piscina (punto 8) y el principal punto de entrada al bajo (punto 1). El único parámetro que presenta una diferencia marcada

es el oxígeno, debido a que en el trayecto desde la salida (punto 8) hacia el punto 1, se presentan caídas por el declive de terreno generando una ganancia de oxígeno.

En cuanto a los puntos de entrada por infiltración de las piscinas, el punto 4 es similar al punto 7 en lo referente al pH y cloruros, y son los responsables de la acidificación de las zonas 2 y 4. Los niveles de oxígeno son bajos y corresponden a lo esperado en este tipo de aguas.

En el punto 5 se registran las mayores fluctuaciones de los parámetros evaluados por la dinámica hídrica del sistema Ciénaga-Bajo, que se presenta a través del tiempo de evaluación.

Sobre los puntos localizados en las zonas de siembra (puntos 2, 3 y 6), se evidencia una tendencia a la disminución paulatina de las concentraciones de cloruro y bario a medida que las aguas drenan sobre las diferentes zonas de siembra, lo cual se debe a la interrelación de dos factores: efecto del manglar e hidrodinámica del sistema.

### Suelos.

De acuerdo con la Tabla 2, los puntos más ácidos son los que corresponden a las aguas de infiltración (4 y 7) y los que están en íntima relación con las zonas de siembra aledañas a estos puntos (3 y 6).

Los análisis muestran que hay una permanencia constante de cloruros en los suelos, de los diferentes puntos de muestreo, lo cual puede tener una relación

Tabla 1. Resultados de las variables fisicoquímicas del agua por rangos de variación (valores mínimo y máximo) a lo largo del período de experimentación.

VARIABLE	Puntos de muestreo							
	1	2	3	4	5	6	7	8
O. D. (gm <sup>-3</sup> )	4,5 - 5,8	3,8 - 5,9	2,1 - 5,5	1,2 - 2,8	1,9 - 4,8	1,0 - 4,9	2,9 - 4,1	0,8 - 3
pH (Unid.)	6,5 - 7,0	6,5 - 6,8	4,3 - 5,2	3,9 - 4,1	3,7 - 6,2	3,8 - 5,0	3,8 - 4,2	6,2 - 6,4
Conduc. (mSc/cm)	67 - 82	70 - 78	18 - 80	58 - 70	2,0 - 53	8, - 58	32 - 82	68 - 83
Cloruros (kgm <sup>-3</sup> )	22,5 - 30	18 - 30	8, - 30	18 - 24	0,8 - 25	1, - 24	15 - 26	24 - 25
Bario (gm <sup>-3</sup> )	33 - 52	35 - 57	12, - 50	18 - 32	0,1 - 33	1,2 - 39	24 - 45	32 - 51
Localización del punto	Entrada al bajo	Siembra Z 1	Siembra Z 2 - Z 3	Filtración	Salida	Siembra Z 4	Filtración	Piscina

Tabla 2. Resultados de las variables fisicoquímicas del suelo por rangos de variación (valores máximo y mínimo) a lo largo del período de experimentación

VARIABLE	Puntos de muestreo						
	1	2	3	4	5	6	7
pH (Unid.)	6,5 - 8,2	4,5, - 7,2	4 - 6,3	4 - 6	4 - 7	4,5 - 6,5	4,1 - 4,5
Cloruros (kgm <sup>-3</sup> )	5,1 - 6	6 - 18	5 - 18	5,5 - 15	2,5 - 18	5 - 15	5 - 11
C.O.T (%)	0,09 - 1,13	0,2 - 1,5	0,2 - 23	0,1 - 1,6	0,2 - 1,8	0,1 - 1,8	0,1 - 1,2
Bario (gm <sup>-3</sup> )	62 - 375	30 - 75	30 - 700	20 - 86	30 - 193	25 - 63	30 - 155
Hierro (%)	2,6 - 3,4	0,5 - 2,8	3,9 - 13, 6	1,4 - 1,5	2,2 - 2,3	2,9 - 3,1	0,8 - 1
Localización del punto	Entrada al bajo	Siembra Z 1	Siembra Z 2 - Z 3	Filtración	Salida	Siembra Z 4	Filtración

directa con la acidez. De acuerdo con Bornemisza (1982), la retención de aniones por parte de cargas positivas aumenta al disminuir el pH.

El bario (Tabla 2) presenta una mayor acumulación en el punto 1. Dicho punto recibe directamente las aguas de producción que dan su mayor aporte al sistema, e influyen hasta el tercer punto de muestreo. Las zonas de siembra (puntos 2, 3 y 6) registran una acumulación considerable de bario; el cual está siendo quelado o inmovilizado por la materia orgánica que se está acumulando (WHO, 1990), y también por el microambiente generado por las raíces de mangle que al oxidar el sedimento ayudan a formar con los sulfuros presentes, sulfatos que precipitan el bario (Silva *et al.*, 1990).

Las concentraciones de hierro fluctuaron entre 0,5% y 13,6%, cantidades que unidas al pH ácido del suelo pueden convertirse en sustancias fitotóxicas, la acidez favorece la absorción del hierro por la planta, cuya toxicidad se manifiesta con un marchitamiento en las hojas jóvenes causando la muerte. Sin embargo, esto no se evidenció en el manglar del Llanito.

En general, la acumulación de cloruros en el suelo aumenta a medida que pasa el agua a través de las zonas de siembra (trayectos 7, 6 y 5 y trayectos 1, 2, 3 y 5).

### Biológicos.

Para evaluar los biofiltros se tiene en cuenta el desarrollo presentado por las plantas y la capacidad de bioacumulación. Las variables que se consideran son supervivencia, variación foliar, crecimiento y estado fitopatológico de las plantas sembradas. Así mismo, se

verifica la bioacumulación de bario, a través de análisis químicos a nivel de tejido vegetal en las diferentes partes de las plantas.

Para evaluar la influencia climática sobre la supervivencia, la variación foliar y el crecimiento, se realizó una ANDEVA de dos vías para cada una de las especies, considerando como tratamiento la época climática, como variables las especies y como observaciones los datos obtenidos en cada zona. Los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre especies en cuanto a supervivencia y crecimiento, pero para la variación foliar se encontró una alta significancia ( $p < 0,01$ ) demostrando que el comportamiento foliar es diferente entre las especies a lo largo del tiempo de experimentación (Tabla 3).

Igualmente, se realizó otra ANDEVA de dos vías con el fin de ver la influencia de las zonas sobre la supervivencia, crecimiento y variación foliar de cada una de las especies, tomándose como variable cada especie y como observaciones los datos obtenidos en cada época. Los resultados indican que el comportamiento de la supervivencia, crecimiento y variación foliar es independiente de la zona, mientras que el crecimiento y la variación foliar fueron altamente significativas ( $p < 0,01$ ), demostrando que para las plantas el comportamiento de estas dos variables es inherente a cada especie evaluada, independientemente de las condiciones de la zona (Tabla 3).

La supervivencia general registrada para las tres especies al final del experimento fue mayor del 75.5%; Cintrón (1984), reporta para el medio natural no

Tabla 3. ANDEVA de dos vías para influencia climática y de las zonas de experimentación en la supervivencia, crecimiento y variación foliar de la especies *R. mangle*, *A. germinans* y *L. racemosa*.

ANDEVA DE DOS VÍAS									
INFLUENCIA CLIMÁTICA					INFLUENCIA DE LAS ZONAS				
<b>Supervivencia</b>									
Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.
A	8440,6	2	4220,3	0,00035081	A	1304,6	2	652,3	5,42E-05
B	3635,8	3	1211,9	0,00010074	B	1178,0	3	392,6675	3,26E-05
AB	19485,1	6	3247,5	0,00026995	AB	35095,1	6	5849,18277	0,00048628
Tratamientos	31561,5	11			Tratamientos	37577,7	11		
Residuo	433083970,1	36	12030110,3		Residuo	433027140,1	36	12028531,7	
Total		47			Total		47		
<b>Crecimiento</b>									
Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.
A	2356,4	2	1178,17906	3,81	A	1025,6	2	512,8	7,98
B	1209,4	3	403,133308	1,30	B	577,4	3	192,452115	2,99
AB	952,0	6	158,667537	0,51	AB	202,9	6	33,8171775	0,53
Tratamientos	4517,8	11			Tratamientos	1805,9	11		
Residuo	11122,3	36	308,953513		Residuo	2312,4	36	64,2326848	
Total		47			Total		47		
<b>Variación Foliar</b>									
Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.	Fuente	SC	g.l.	CM	R.V.
A	114984610,2	2	57492305,1	35,75	A	110203822,2	2	55101911,1	37,06
B	27646527,0	3	9215509	5,73	B	12593981,5	3	4197993,83	2,82
AB	16689421,5	6	2781570,25	1,73	AB	7718354,5	6	1286392,42	0,87
Tratamientos	159320558,7	11			Tratamientos	130516158,2	11		
Residuo	57897024,0	36	1608250,67		Residuo	53525513,1	36	1486819,81	
Total		47			Total		47		
Factor A: Las especies ( <i>R. mangle</i> , <i>A. germinans</i> y <i>L. racemosa</i> ).					Factor A: Las especies ( <i>R. mangle</i> , <i>A. germinans</i> y <i>L. racemosa</i> ).				
Factor B: Los monitoreos					Factor B: Las zonas de siembra.				
Factor AB: La interacción de A y B					Factor AB: La interacción de A y B				

SC: Suma de cuadrados; g.l.: Grados de libertad; CM: Cuadrado medio; R.V.: Razón de varianza

intervenido, supervivencias promedio hasta del 60%. *A. germinans* presentó los mayores porcentajes de supervivencia (85,5%), siguiéndole *R. mangle* (72,1%)

y *L. racemosa* (68,9%).

A pesar de los resultados obtenidos por la ANDEVA (2 vías) para la supervivencia (Tabla 3), se

observó que *A. germinans* presentó los mayores valores en las áreas con menor grado de inundación (Zonas 1, 2 y 4), contrario a lo que ocurrió con *R. mangle*, la cual alcanzó su mayor supervivencia en las zonas con mayor inundación (Zona 3). En cuanto a las condiciones físicas del suelo, se observó que en las zonas con apariencia limosa y bajo grado de compactación (Z2, Z3, Z4) las especies *R. mangle* y *L. racemosa* presentaron mayores tasas de supervivencia (Tabla 3). Sin embargo, estadísticamente estas diferencias no son significativas y demuestran que las diferentes condiciones físicas del bajo no afectan la supervivencia de las especies.

El número de hojas se escogió como una variable representativa del desarrollo de las plantas, ya que está directamente relacionada con su estado nutricional y de salud (Córdova, 1976).

Se evidencia una variación foliar característica para cada especie, lo cual es corroborado por la ANDEVA (Tabla 3). La variación presentada por cada especie fue favorable porque se registró un aumento paulatino del número de hojas en el tiempo (Figura 2, Tabla 4). En términos del biofiltro, es una manifestación de que la planta está tomando del medio los elementos necesarios para su normal desarrollo y no se manifiestan signos anómalos por las condiciones del medio.

En *A. germinans*, el rango menor de hojas disminuye a través del tiempo de experimentación registrado en cada monitoreo, con un consecuente aumento de los demás rangos, mostrando un incremento progresivo en el número de hojas (Figura 2, Tabla 4), el cual sólo se ve detenido en las épocas de verano (M1), este comportamiento fue similar en las tres especies.

Las dificultades que puedan presentar las plantas se manifiestan en la alteración de su ritmo de desarro-

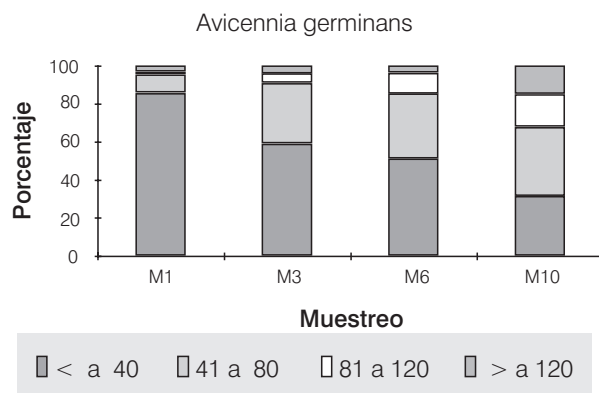


Figura 2. Porcentaje de variación foliar de *Avicennia germinans* durante el periodo de experimentación

llo; por lo cual la talla es un buen indicador del estado de las plantas; siempre y cuando sea analizada con las otras variables.

Durante el tiempo de experimentación no se vio una influencia significativa del clima sobre el crecimiento, lo cual se puede deber, entre otras, a que las plantas siempre estuvieron inundadas. Las condiciones reinantes en el área no incidieron en el crecimiento de las tres especies y mostraron que el desarrollo de las plantas, se ajusta al presenciado en las zonas costeras; el cual corresponde a una mayor velocidad de crecimiento durante las épocas lluviosas (invierno) y a una menor tasa de crecimiento durante las época seca (verano) (Tabla 5). Sin embargo, estas velocidades no fueron estadísticamente significativas para las épocas de muestreo.

Al igual que la variación foliar, el crecimiento fue inherente de cada especie (Tabla 3); es así como *R. mangle* presentó los mayores incrementos de altura (0,175 m, Tabla 5) durante los últimos monitoreos (6 a

Tabla 4. Variación foliar de *A. germinans* a lo largo del experimento y en cada una de las zonas de siembra

RANGOS DE HOJAS	Zona 1				Zona 2				Zona 3				Zona 4			
	M1	M3	M6	M10	M1	M3	M6	M10	M1	M3	M6	M10	M1	M3	M6	M10
< a 40	93,7	66,3	61,9	42,7	77,2	44,1	26	20,4	91	68,3	66,6	32	80,5	56,8	49,4	30,4
41 a 80	5,4	25,9	28,7	31	14,3	44,2	45,6	34,1	4,5	22,7	22,2	48	14,6	35,3	40	30,5
81 a 120	0,9	4,9	7,6	16,2	2,8	4,7	19,8	25		4,5	11,2	12	1,2	5,9	5,9	15,3
> a 120		2,9	1,8	10,1	5,7	7	8,6	20,5	4,5	4,5		8	3,7	2	4,7	23,8

Los valores están dados en porcentaje.

10), mientras que *A. germinans* presentó un comportamiento más constante.

Fitopatológicamente no se registraron signos de estrés físico (defecto o exceso de luz, bajas o altas temperaturas, etc.), ni químico (exceso de ciertos iones y cambios osmóticos), ni estrés biológico (infecciones por hongos, bacterias o virus, etc.). Tampoco se observaron manifestaciones de deficiencias nutricionales en las plantas, por el contrario las plantas durante todo el período de experimentación presentaron un aspecto saludable.

**Observaciones ecológicas.**

El éxito de la recuperación a nivel ecológico se basa en la restauración de las relaciones ínter y extra específicas entre las especies existentes y el medio, relaciones que se perdieron al verter agua de producción en el bajo, dando como resultado que la comunidad nativa desapareciera. Por tanto, la reaparición de cualquier tipo de vida dentro del bajo se considera una consecuencia adicional al proceso restaurador del manglar.

En el Llanito, la aparición de las primeras etapas de sucesión (presencia de cianofíceas o algas fijadoras de nitrógeno en el suelo) seguida por organismos pertenecientes a los diferentes niveles tróficos (herbívoros, carnívoros, etc.), muestra que el manglar ofrece nuevas posibilidades a las especies vegetales y animales del área para que puedan desarrollarse, mejora las condiciones del suelo, ofrece alimento y sirve como refugio a una gran cantidad de organismos y ratifica lo expuesto en la literatura acerca del carácter de vida que encierra el manglar (Odum, 1984).

Lo anterior demuestra la influencia del manglar en

Tabla 5. Altura media en centímetros para las tres especies a través del tiempo

Especie	MUESTREO				
	0	(0 a 1)	(1 a 3)	(3 a 6)	(6 a 10)
R. Mangle	40,1	40,7	43,9	51,1	68,6
L. Racemosa	55,4	66	69,6	72,9	73,5
A. Germinans	52,6	53,7	60,2	64,4	65,2

El lapso de tiempo entre cada monitoreo es de aproximadamente de 3 meses: 0 a 1: verano, 1 a 3: invierno, 3 a 6 invierno 6 a 10: transición de finales de invierno e inicio del verano

la recuperación del suelo, puesto que la aparición de estos organismos estuvo asociada exclusivamente a los sitios en donde éste se encuentra. Por lo tanto, el manglar no sólo realiza una labor de filtro sino que a su vez genera condiciones propicias para que otras especies menos resistentes puedan recolonizar el área afectada por las aguas de producción. Esto en términos de recuperación es relevante, puesto que significa un restablecimiento de los flujos energéticos en el sistema y se traduce en una recuperación biológica del área.

Todo lo anterior reafirma la importancia que ha tenido el manglar en la generación de las interrelaciones ecosistémicas que se dan en la naturaleza, permitiendo que se restauren los intercambios energéticos.

**Bioacumulación.**

Se realizaron diferentes análisis para verificar la acumulación y distribución de los iones cloruro y bario en los tejidos vegetales de acuerdo con la especie, con la parte de la planta y con la época climática. Se reafirma la labor acumuladora de iones cloruro que tiene el manglar, mostrando que en términos de biofiltro, la biología del manglar permanece inalterada y su forma de acumulación por especie se sigue manteniendo, a pesar del nuevo ambiente no costero y las aguas de producción.

**Bario.**

Como el bario no es un elemento esencial dentro de las plantas y su forma de penetración a ésta no obedece a un transporte pasivo (difusión), su presencia en los tejidos vegetales indica que tuvo que ser atrapado y conducido al interior de la planta, mediante un proceso activo que básicamente es un intercambio iónico (Garcidueñas, 1972). De acuerdo con Bornemisza (1982) y a la WHO (1990), el bario tiene una gran similitud con el catión  $Ca^{+2}$  y a la vez presenta un poder intercambiador mayor en comparación con muchos otros iones mono y bivalentes, lo que facilita su absorción por la planta cuando se encuentra en forma de ion o de sal ionizada. La única forma en que el bario no es incorporado por los vegetales es cuando se encuentra en forma insoluble, como sulfato de bario (WHO, 1990).

La presencia de bario en los tejidos de las tres especies de manglar se puede dar posiblemente gracias a lo explicado antes, ya que el calcio (como elemento esencial) es tomado activamente por la planta para poder



suplir sus necesidades metabólicas (de crecimiento, energéticas y de sobrevivencia). Igualmente, si existen en el agua otros cationes monovalentes o bivalentes, el bario (por ser retenedor) puede competir e incluso ganar y penetrar más fácilmente al interior de la planta (WHO, 1990).

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tablas 6 y 7), existe una respuesta diferencial de acumulación en tejidos según la especie, época climática y parte de la planta. Barceló y Poschenrieder (1989) describen una heterogeneidad en la acumulación de metales pesados de acuerdo con la especie, y a la parte de la planta.

Al analizar la retención total de bario de acuerdo con la época climática, se observa que hay una mayor concentración en la época de verano, al tiempo que el contenido de bario en el sedimento de las zonas que tienen manglar aumenta (Tabla 2), indicando que una parte del bario está siendo atrapado a nivel radicular en el sedimento de una forma no asimilable y en el resto en las diferentes partes de la planta, sin evidencia de daño, de acuerdo con lo expuesto en los resultados de los parámetros biológicos.

En general, *R. mangle* presenta la mayor concentración del ion en ambas épocas y es seguida por *A. germinans* en invierno, y en verano, por *L. racemosa*. Las especies que menos se ven afectadas por la época climática son *R. mangle* y *A. germinans*. En cambio *L. racemosa*, presenta un cambio drástico sin demostrar un patrón definido.

En cuanto a la distribución del bario, *R. mangle* presenta el mismo patrón de distribución tallo-raíz-hoja, durante las dos épocas climáticas. *A. germinans* también mantiene un patrón de distribución, mayor acumulación en hojas (deja pasar más fácilmente iones

Tabla 6. Acumulación de bario en tejidos vegetales. Época de invierno (mg/k, peso seco).

	R. mangle		A. germinans		L. racemosa	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Raíz	0,001	130	0,002	46	N.D. *	10
Tallo	0,003	180	0,002	47	N.D. *	7
Hojas	N.D. *	95	0,005	74	0,001	20

\* N.D.= No detectado.

Tabla 7. Acumulación de bario en tejidos vegetales. Época de verano (mg/k, peso seco).

	R. mangle		A. germinans		L. racemosa	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Raíz	0,001	225	0,002	23	N.D. *	230
Tallo	0,003	325	0,002	49	N.D. *	131
Hojas	N.D. *	33	0,005	150	0,001	110

\* N.D.= No detectado.

debido a que no posee el sistema de ultrafiltración de *R. mangle*) y menor en raíz. Finalmente, *L. racemosa* presenta una mayor concentración de bario en raíz durante la época de verano y en hojas en el invierno.

La acumulación de bario en hojas (en *A. germinans* y en *L. racemosa*), se explica si se tiene en cuenta que ambas especies son consideradas poco selectivas en la absorción de iones, ya que no poseen sistemas de filtración como el de *R. mangle*. Además, para la época de verano, al aumentar la temperatura, la evapotranspiración se incrementa y los fluidos tienden a ascender por la planta (con sus iones disueltos) hacia las partes más terminales, las cuales al tener los poros cerrados (estomas) para evitar la salida de agua, provocan la acumulación de iones a este nivel. En el caso de alta humedad, es posible que se dé un proceso de gutación (excreción de agua en las hojas por presiones internas de la planta) y esté generando una mayor acumulación del ion en las hojas (Cronquist, 1984).

Adicionalmente, como la distribución de iones dentro de la planta está sujeta a la movilidad del ion y a su requerimiento metabólico (Jayasekera, 1991), es posible que la dinámica del bario, dentro de la planta, dependa de su forma de presentación y de la funcionalidad o no del ion hacia la planta.

Los resultados preliminares del trabajo realizado por Ecopetrol-BOG (sin publicar), muestran un buen desarrollo de las plantas a los 312 días de experimentación y una bioacumulación de metales pesados. A los 312 días los datos reportan una bioacumulación promedio de 50,28 ppm de Bario en *A. germinans* y de 69,94 ppm de Cr y en *R. mangle* de 73,42 ppm y de 57,44 ppm de Cr, con una distribución de los metales de acuerdo con la descrita por especie y a la parte de la planta; corroborando lo expuesto y observado en El Llanito.

## CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos bajo condiciones de campo (Llanito) durante el tiempo de experimentación, corroboran la capacidad innata que posee el manglar como herramienta de aplicación en el tratamiento de aguas residuales que contengan metales pesados. El manglar del Llanito presenta el mismo comportamiento que se da en las zonas naturales costeras, sin respuestas atípicas; lo cual se confirma con la buena adaptación a las condiciones ambientales y se traduce en la alta supervivencia, buen desarrollo, reproducción y ausencia de enfermedades.
- La sobrevivencia de las especies fue independiente de las condiciones ambientales y de las zonas, y el comportamiento de crecimiento y variación foliar es característico de cada especie.
- El manglar presenta un amplio rango de tolerancia a altas concentraciones de hierro, bario y cloruros; a pH ácidos y frente a otras sustancias químicas presentes en las aguas de producción, que no inhiben su desarrollo y sí lo confirman como biodepurador.
- *R. mangle* bioacumuló la mayor cantidad de bario, y presentó sus mayores porcentajes de supervivencia en las zonas de siembra con mayor inundación. La aparición de bario en los tejidos de las plantas no genera ningún efecto adverso en la salud del manglar y si confirma la retención efectiva que se hace del metal.
- El manglar cumple el objetivo de filtro biológico, puesto que realiza la retención de metales pesados a través del microambiente que desarrolla y los fija, principalmente, en sus tejidos leñosos no perennes (tallos, ramas y raíces).
- Basados en las observaciones ecológicas, se dio una recuperación franca del terreno por la generación del proceso sucesional que permite la renovación de las condiciones del área con miras a alcanzar el equilibrio biológico.
- Las condiciones ambientales del área experimental son favorables para el desarrollo del manglar.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al ingeniero Henry Echeverry por el apoyo incondicional, a los ingenieros Edgar Márquez, Eduardo Motta, Pedro Quintero y Marcos Trillos y, en general, a todo el grupo del Proyecto de Reinyección de ELC, por la gran colaboración y el entusiasmo mostrado hacia el proyecto. A los ingenieros Gustavo Villa, Jairo Mejía, Wilson Vásquez y a todo el grupo de La Unidad Ambiental de ELC por la colaboración e interés prestado. Al grupo de PROCIGA-6 por la ayuda desinteresada y por el interés mostrado hacia el proyecto. A los ingenieros Aidaly Bonnet y Fernando Quintero por el apoyo en los muestreos en campo, y al señor Sol Angel Peñate por la activa participación y el apoyo en la ejecución de este proyecto.

Adicionalmente, agradecen a la Gerencia de producción Bogotá, Campo de Producción Toldado por permitir la publicación de los resultados preliminares.

Por último, damos un especial agradecimiento a todas las personas que nos creyeron y nos dieron la oportunidad de soñar en un mundo verde.

## BIBLIOGRAFÍA

- Apha, Awwa y Wef., 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Edition. APHA.
- Barceló, J. C. y Poschenrieder, D., 1989. "Estrés vegetal inducido por metales pesados", *Scientific American*, 154: 54-63.
- Bornemisza, E., 1982. *Introducción a la química de los suelos*, Washington, D. C. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico: 74.
- Carlton, J. M., 1974. "Land-building and stabilization by mangroves *Environmental Conservation*", 1 (4): 285 - 293.
- Cintron, G., 1984. "Establishment and restoration of mangroves. Marine Resources Section", *Technical Report*, Puerto Rico: 17.
- Córdova, C. V., 1976. *Fisiología Vegetal*, 3a ed., Madrid. H. Blume, ediciones Rosario, 17: 439 p.
- Cronquist, A., 1984. *Introducción a la botánica*, 2da. ed. México, C. E. C. S. A.: 848p.

- García, B., 1994. *Compendio de términos comunes utilizados en estudios ambientales de la industria petrolera*, Santafé de Bogotá, Ecopetrol.
- Garcidueñas, M. R., 1972. *Fisiología vegetal aplicada*, México, Mc Graw-Hill: 252 p.
- IGAC - Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", 1975. *Estudio hidrodinámico de la región del Caribe*, Bogotá D. E.: 198.
- IGAC - Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", 1980. *Diccionario enciclopédico de Colombia*, Tomo I, Segunda edición, Bogotá, D. E.: 788.
- Jayasekera, R., 1991. "Chemical composition of the mangrove, *Rhizophora mangle* L.", *J. Plant Physiol.*, 138: 119 - 121.
- Miller, P. C., Stoner, W. A., Hom, J. y Poole, D., 1982. "Potential influence of terminal effluents on the production and water use efficiency of mangrove species in South Florida": 39 - 45, Sin datos bibliográficos.
- Lacerda, L. D. P. y Rezende, C. E., 1987. "Metal geochemistry in mangrove sediments", *I Simposio sobre ecosistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira: Síntese dos conhecimentos*, Cananéia. Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 3: 123 - 131. (Publicação ACIESP, n.54-III)
- Lacerda, L. D., Rezende, C. F., Villela, D. J., Wasserman, J. C. y Fernández, H. C., 1985a. "Mineral concentration in leaves of mangrove trees". *Biotrópica*, 12 (3): 260 - 279.
- Lacerda, L. D., Rezende, C. F., Villela, D. J., Wasserman, J. C. y Fernández, H. C., 1985b. "Composición metálica de las hojas de manglar del suroriente de la costa brasilera", *Rev. Brasil. Biol.*, 46 (2): 395 - 399.
- Odum, E.P., 1984. *Ecología*, 3a. ed., México. Interamericana, 639 p.
- Olaya, H., Martínez, D. C., Leguizamón, I. y Pineda, F., 1987. "Los bosques de mangle del antiguo delta del río Sinú (Córdoba - Colombia)", *Estudio de la vegetación y aprovechamiento*, Montería, Universidad de Córdoba - Icfes - CVS.
- Pulver, T., 1976. "Transplanting techniques for sampling mangrove trees, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* and *Avicennia germinans* in Florida", *Fla. Dept. Nat. Resour. Fla. Mar. Res. Publ.*, 22: 15.
- Silva, C. A., Lacerda, L. D. y Rezende, C., 1990. "Metal reservoir in a red mangrove forest", *Biotrópica*, 22 (4): 339 - 345.
- Snedaker, S. y Getter, C. D., 1985. *Pautas para el manejo de los recursos costeros*, Research Planning Institute, Inc. 925 Gervais Street. Columbia, U. S. A.: 285
- WHO - World Health Organization, 1990. "Barium". *Environmental Health Criteria*, 107, Finlandia (ed.), Geneva, 148.