

# Biorremediación de humedales contaminados con petróleo

**Fabio Roldan Ph.D**

Unidad de Saneamiento y Biotecnología Ambiental  
**(USBA)**



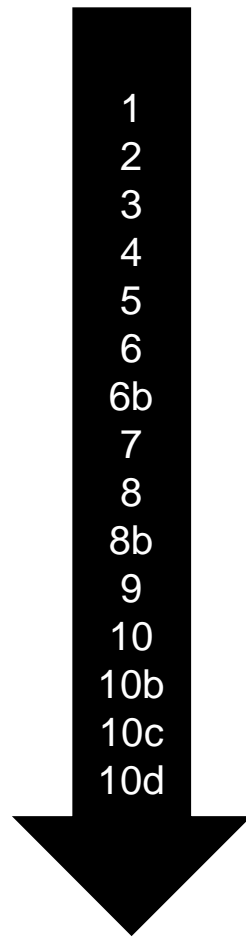
Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Bogotá



# *Shoreline environmental sensitivity index (ESI)*



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE



Ambientes mas sensibles a  
derrames de petr3leo y  
estrategias de remediaci3n

# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1 ●
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)

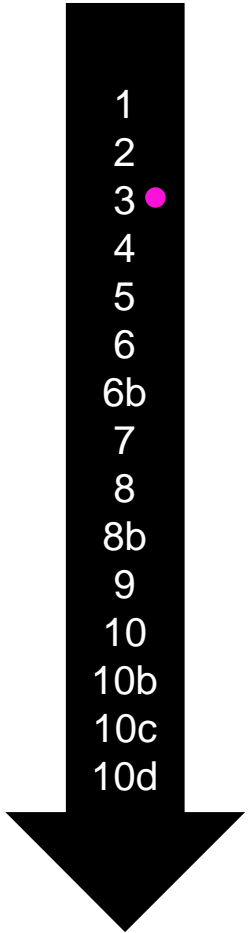


**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

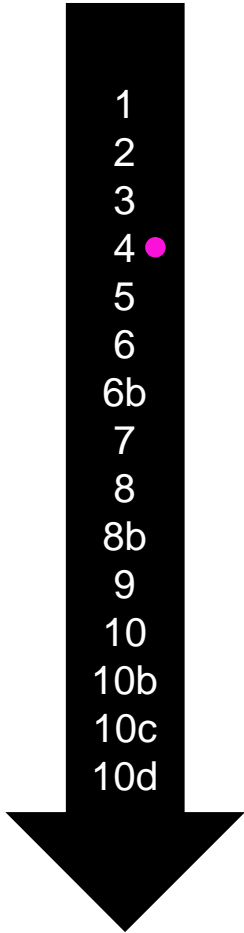
- 1
- 2 ●
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



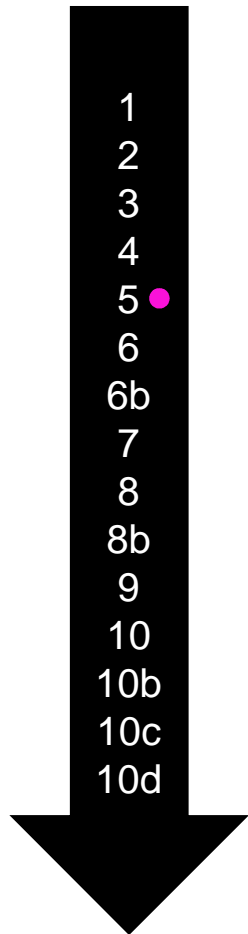
# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

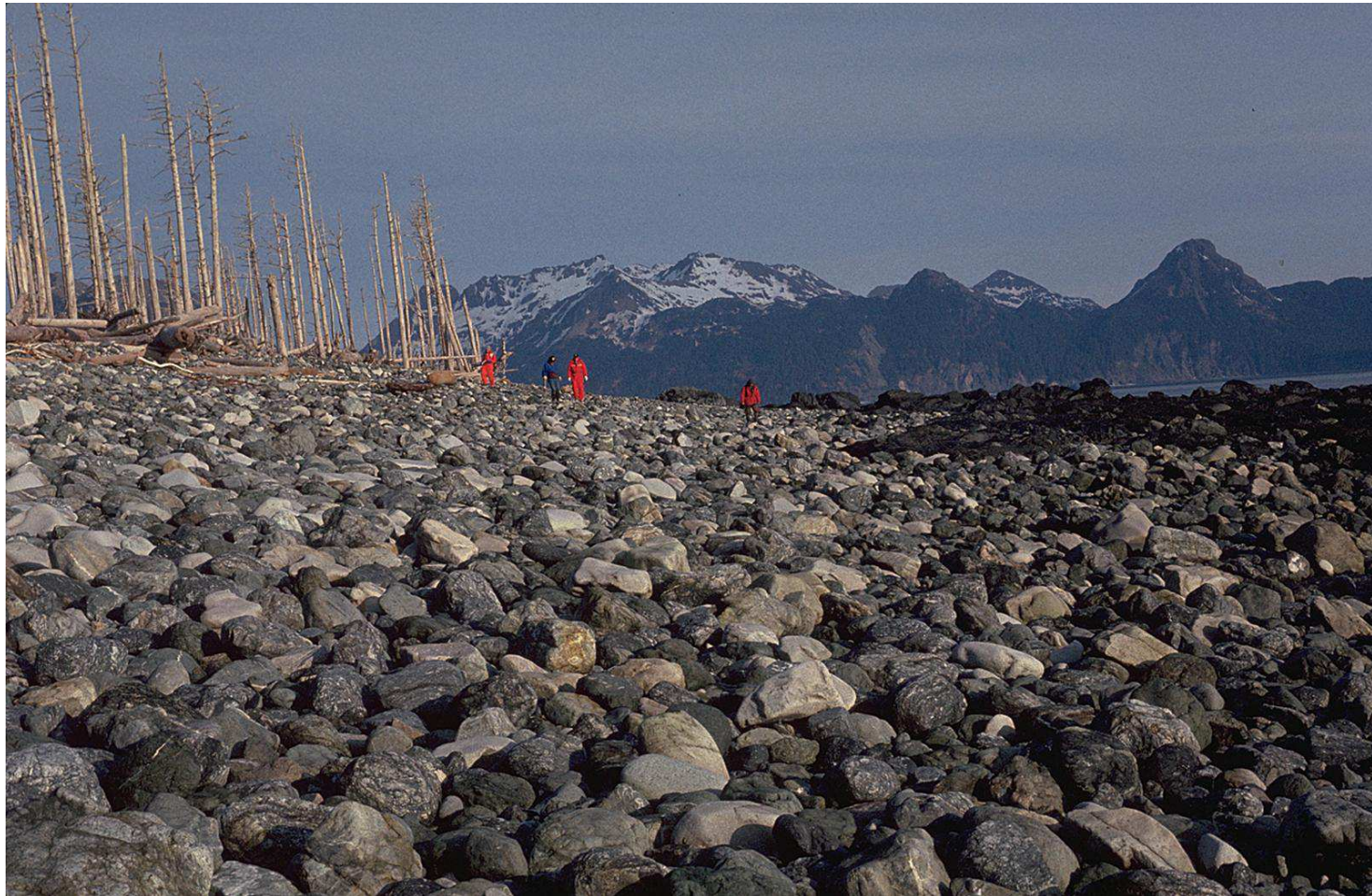


# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6 ●
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d





# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b ●
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7 ●
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8 ●
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

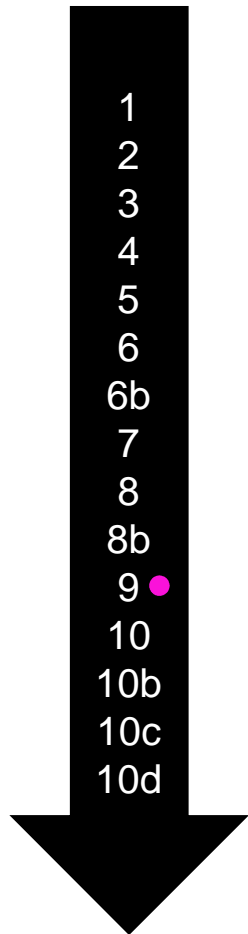
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



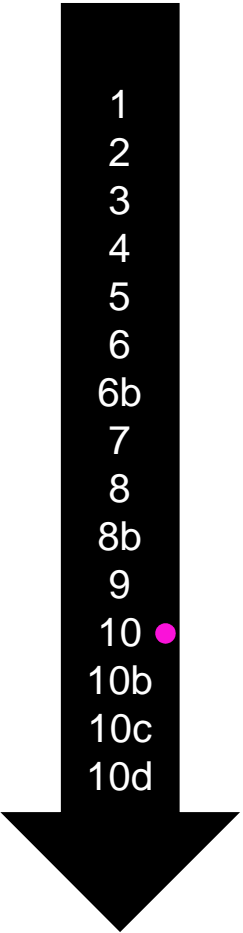
**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b ●
- 10c
- 10d



# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c ●
- 10d





# Shoreline environmental sensitivity index (ESI)



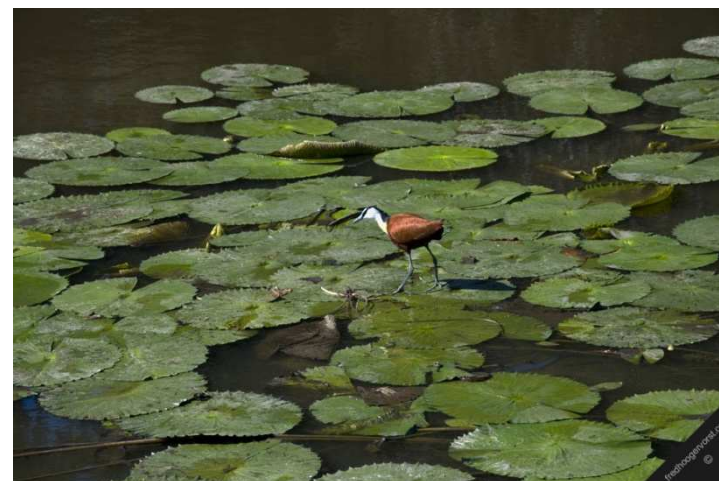
**NOAA** NATIONAL OCEANIC AND  
ATMOSPHERIC ADMINISTRATION  
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 6b
- 7
- 8
- 8b
- 9
- 10
- 10b
- 10c
- 10d ●



# Importancia y servicios ecosistémicos de los humedales

- Ecosistema altamente productivo
- Criaderos y áreas de reproducción
- Refugio de fauna
- Ciclaje de nutrientes
- Almacenamiento de agua
- Mantienen la calidad del agua



<http://www.fredhoogervorst.com/photo/03582134db/>

# Contaminación de humedales por hidrocarburos (HCs)

## Fuentes

- Navegación
- Descarga de aguas
- Residuales
- Derrames de petróleo

## Efectos

- Pérdida equilibrio ecosistémico
- Ciclos biogeoquímicos
- Toxicidad organismos expuestos
- Permanencia a largo plazo
- Penetración profunda dentro del sustrato

# Técnicas de limpieza empleadas en marismas contaminadas

## Métodos físicos

- Remoción mecánica
- Chorros de agua caliente ó a gran presión
- Reubicación de sedimentos “*destruirla para salvarla*”
- Corte de la vegetación
- Quema in situ

Bajos % remoción

## Métodos químicos

- Dispersantes/surfactantes
- Limpiadores

Pueden generar mayor contaminación

# Biorremediación

Remediación de ambientes contaminados utilizando microorganismos, plantas ó enzimas

**Biodegradación** de compuestos orgánicos (contaminantes) generalmente por microorganismos, produciendo:

- Biomasa celular
- Compuestos menos complejos
- Agua, metano y CO<sub>2</sub>

Transformación de compuestos **potencialmente tóxicos** (contaminantes) en productos **menos tóxicos** ó inocuos

# Biorremediación

## Ventajas:

- Económico
- Menor intervención al ecosistema
- Ambientalmente amigable
- No transferencia del contaminante a otra matriz
- Mineralización del contaminante

## Desventaja:

- Mayores tiempos de remediación

# Biorremediación activa

## Bioestimulación

Modificar condiciones ambientales (adición de factores limitantes) para estimular el metabolismo microbiano y la utilización del contaminante

- Nutrientes
- Aceptores terminales de electrones (ATEs)
- Donadores de electrones, pH, humedad

## Bioaumentación

Adición de microorganismos

- Nativos
- Alóctonos (externos)

Resultados muy limitados en campo

# Estudio de caso

**Biorremediación in situ con la adición de oxígeno y nitrato como aceptores de electrones en una marisma contaminada**

*Oxygen and Nitrate Enhanced in situ Bioremediation of an Oil-Contaminated Salt Marsh*



**Fabio Roldán, PhD**



University of New Hampshire [unh.edu](http://unh.edu)

University of New Hampshire  
Department of Civil Engineering



# *El derrame de petróleo del Julie N*

- El carguero *Julie N* impactó el puente de la ruta 77 (Portland, ME)
- Liberación de  $\sim 350 \text{ m}^3$  y  $\sim 330 \text{ m}^3$  de aceites No. 2 y 4, respectivamente.
  - Respuesta inmediata
  - Fuertes vientos y oleaje movieron  $\sim 150 \text{ m}^3$  hacia el río Fore



NOAA

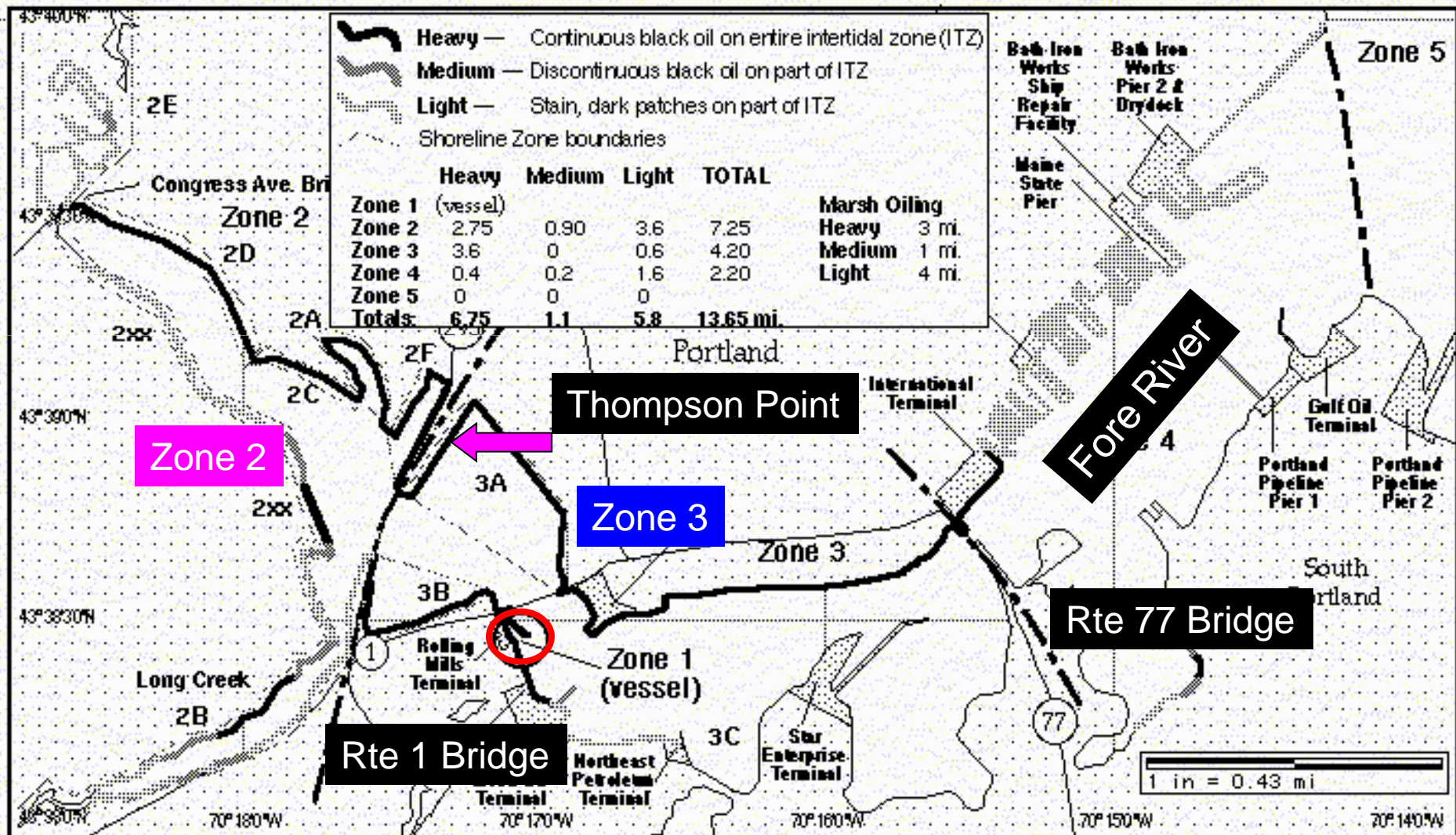
# Tanker JULIE N Incident

Shoreline Oiling Map  
prepared by NOAA

Date/Time: 04 OCT 96, 1000

USE ONLY AS A GENERAL REFERENCE

Graphic does not represent precise amounts or locations of oil



# Sitio de estudio



# *Julie N* tanker



NOAA

# Marisma y ensenada Fore después del derrame del *Julie N*



NOAA

# Fore River Creek salt marsh after the *Julie N* spill



# Presencia de aceite en los lodos de la marisma



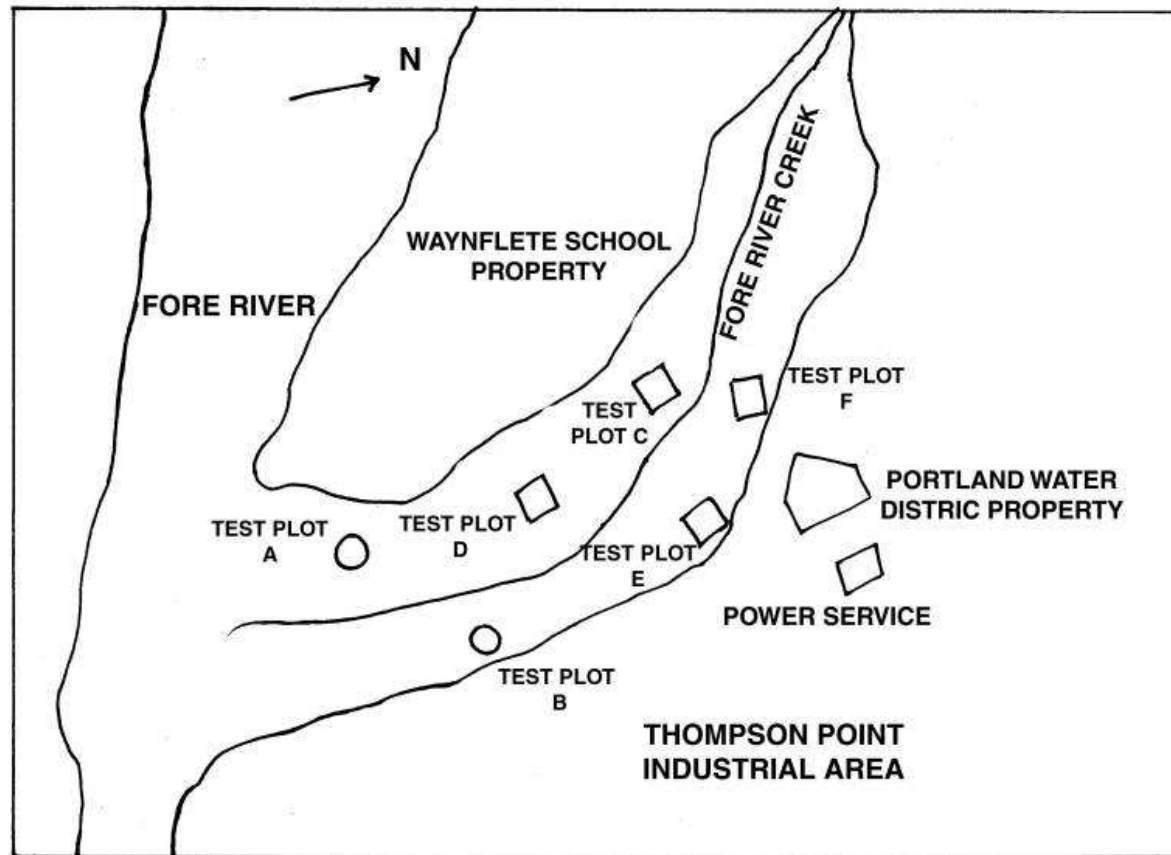


# Objetivo general

Evaluar la habilidad de dos aceptores terminales de electrones (ATEs) ( $O_2$  y  $NO_3^-$ ) para estimular la biodegradación *in situ*.



## Localización de los plots en la marisma del río Fore



# Tratamientos evaluados

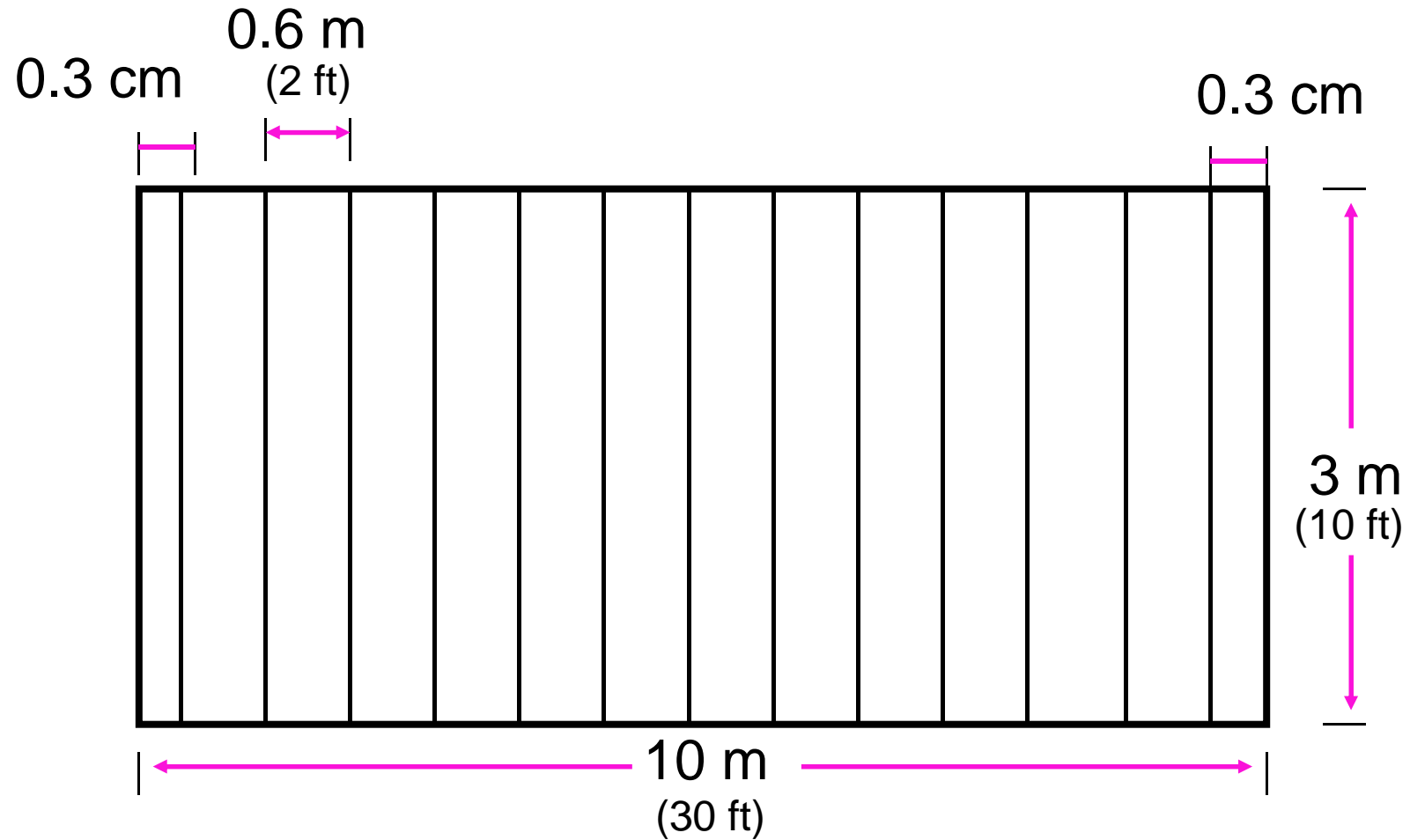
## Aire

- Metabolismo aeróbico
- O<sub>2</sub> como ATE
- O<sub>2</sub> alto rendimiento energético
- Suministro continuo
  - Bomba de bajo flujo :3.2 m<sup>3</sup>/h

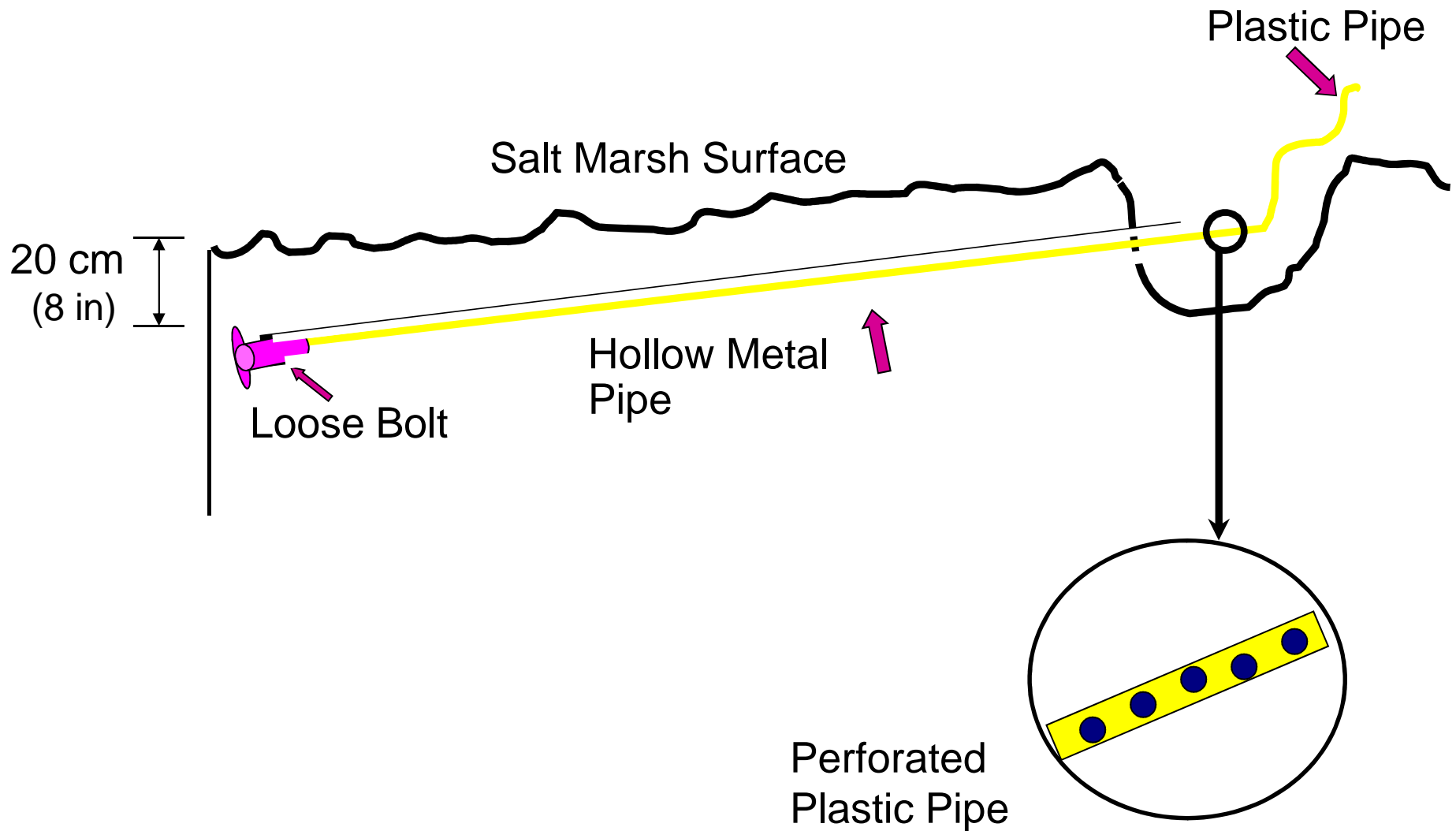
## Solución de nitratos

- Desnitrificantes
- Inyección semanal
  - 430 g Nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>)/28.4 L agua
- Concentración en el volumen de poro (2.27 m<sup>3</sup>)
  - 130 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N /L
- Colocado por gravedad

# Diseño experimental de los plots para $O_2$ y $NO_3^-$



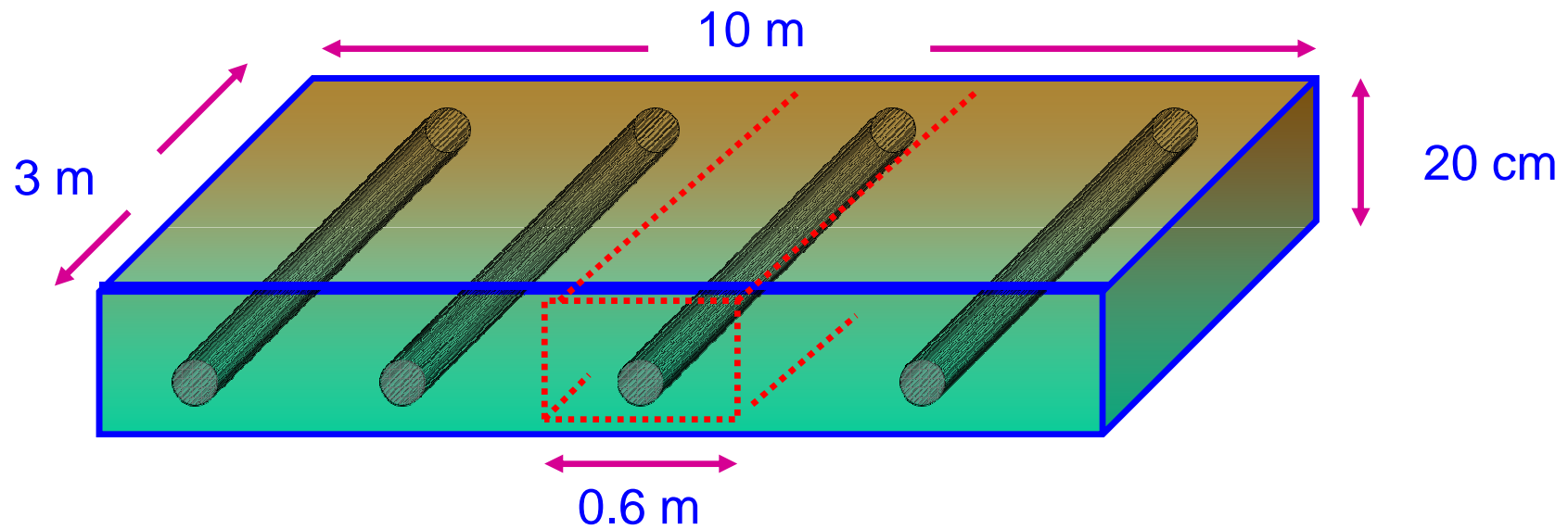
# Instalación de los pozos horizontales



# Sistema de distribución

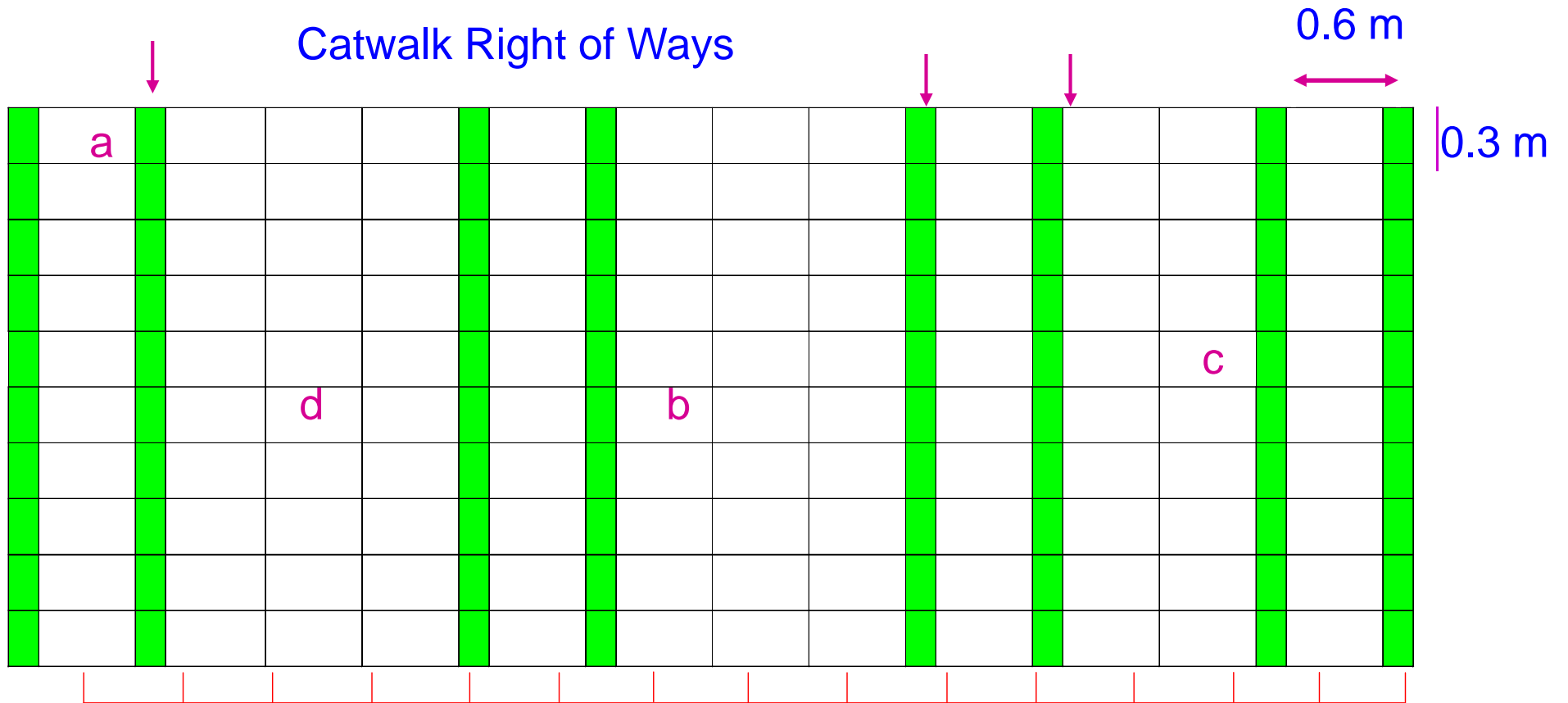


# Experimental plot volume



Plot Volume : 2.27 m<sup>3</sup>

# Cuadrículas experimentales en las parcelas



Delivery System



## Subplots seleccionados durante el muestreo Pasarelas



# Pasarelas usadas durante el estudio

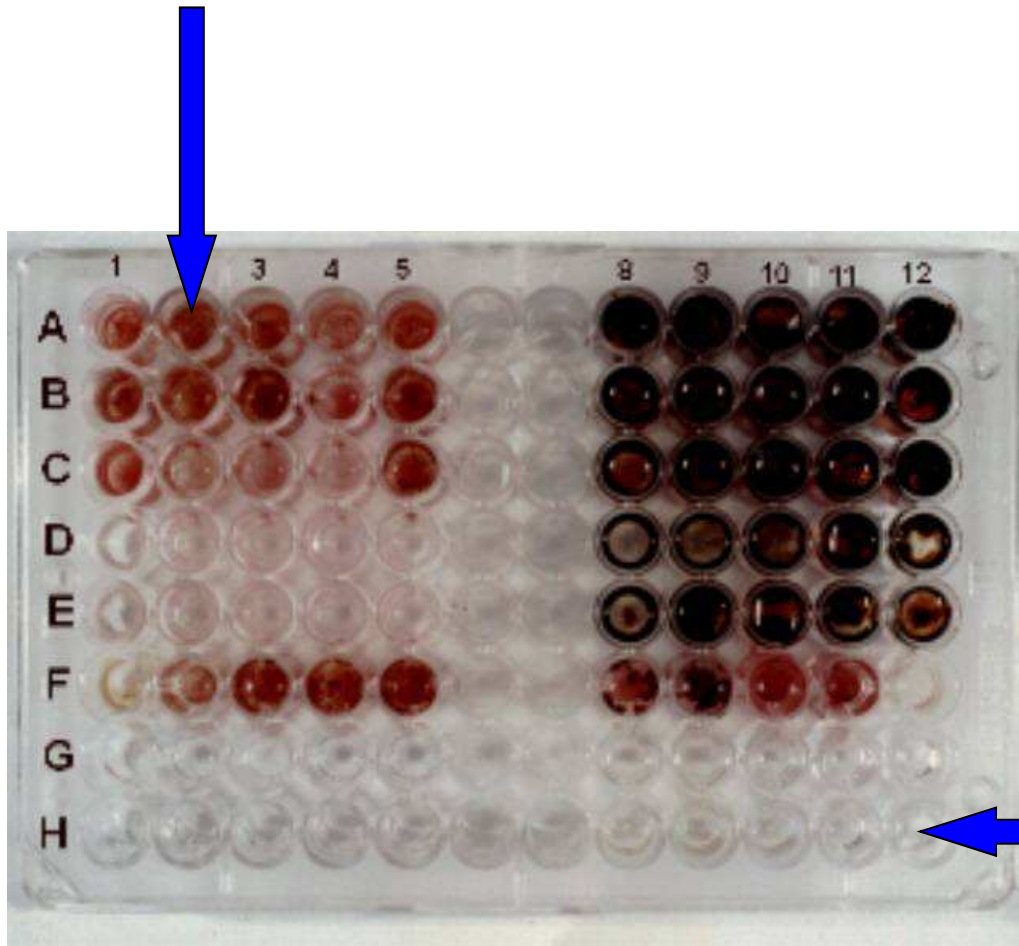


# Monitoreo de la biorremediación

- Hidrocarburos totales de petróleo (TPHs)
- Concentración:
  - Alifáticos de cadena corta, SC ( $C_9 - C_{18}$ )
  - Alifáticos de cadena larga, LC ( $C_{18} - C_{36}$ )
  - Aromáticos ( $C_{11} - C_{22}$ )
- Análisis GC–FID

# Abundancia de microorganismos degradadores

Positivo



- Reducción de INT acoplado a metodo del NMP

El color cambia cuando el INT acepta e- del No. 2 fuel oil como donador de e-.

Negativo

# Crecimiento y densidad de *S. alterniflora*



# RESULTADOS

# Analysis of covariance linear model (ACLM)

A Plot	B Subplot	C Sample	D Time	Y
$i_1$ Air	$j_1$ a	$k_1$ aa $k_2$ ab	1,2,...,365	SC aliph.
$i_2$ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$j_2$ b	$k_3$ ba $k_4$ bb		LC aliph.
$i_3$ Control	$j_3$ c	$k_5$ ca $k_6$ cb	$l_1 \dots l_{365}$	aromatics
	$j_4$ d	$k_7$ da $k_8$ db		

$$\text{Log } Y = m + A_i + B_j(i) + D_l + A D_{il} + C(i,j,k,l) + E(i,j,l)$$

# Modelo de regresión de variables indicadoras (MRVI)

$Z_i$  = variables indicadoras ( $Z_1, Z_2$ )

aire = 1,0

$\text{NO}_3^-$  = 0,1

control = 0,0

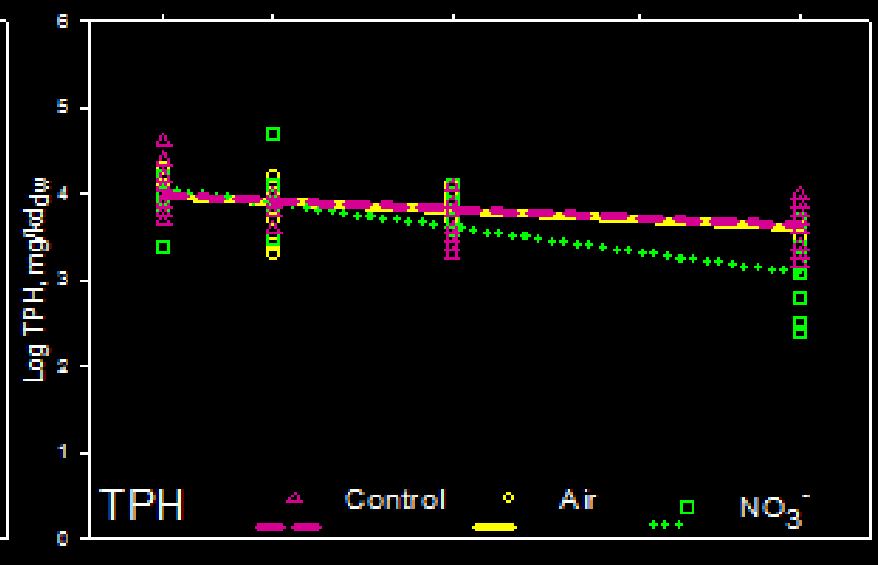
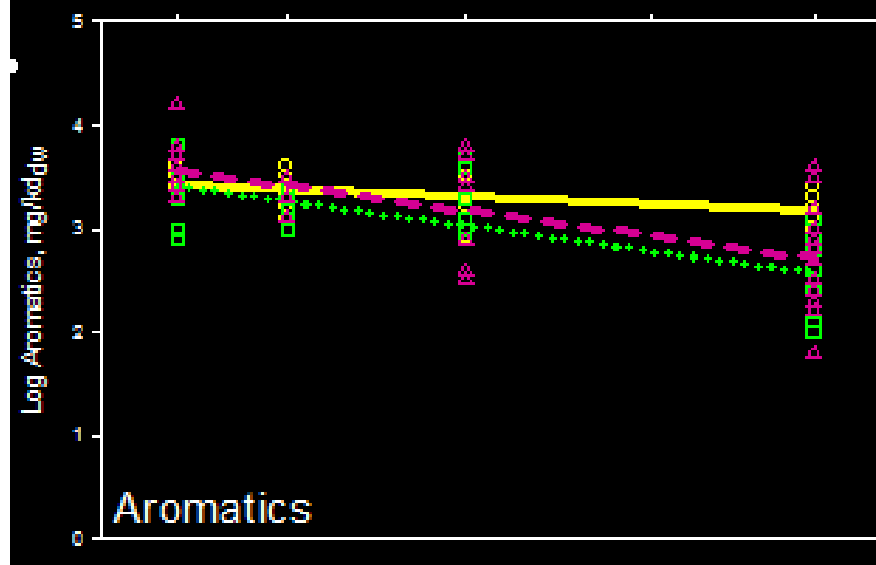
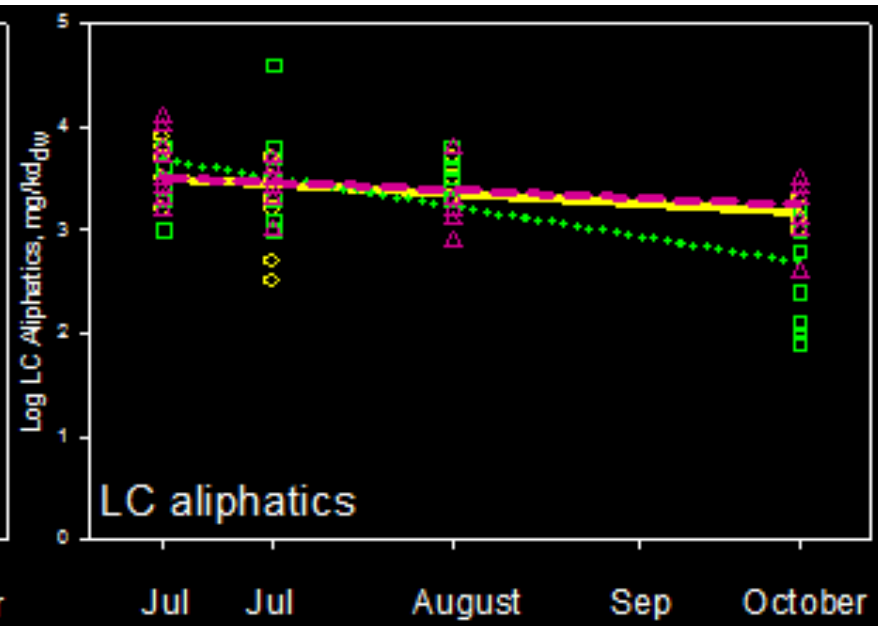
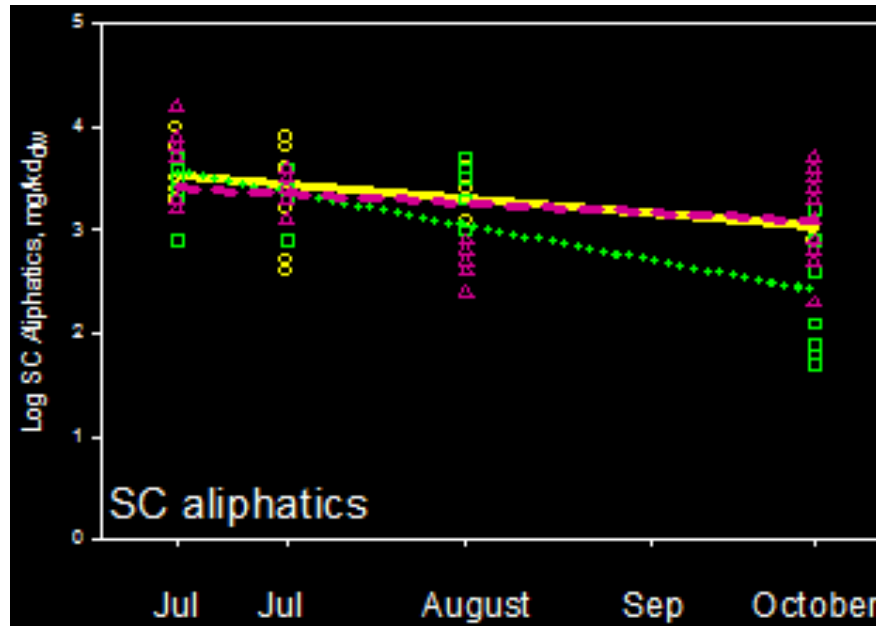
$$\text{Log } Y = m + b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + b_3 \text{time}(Z_1) + b_4 \text{time}(Z_2) + b_5(\text{time})$$

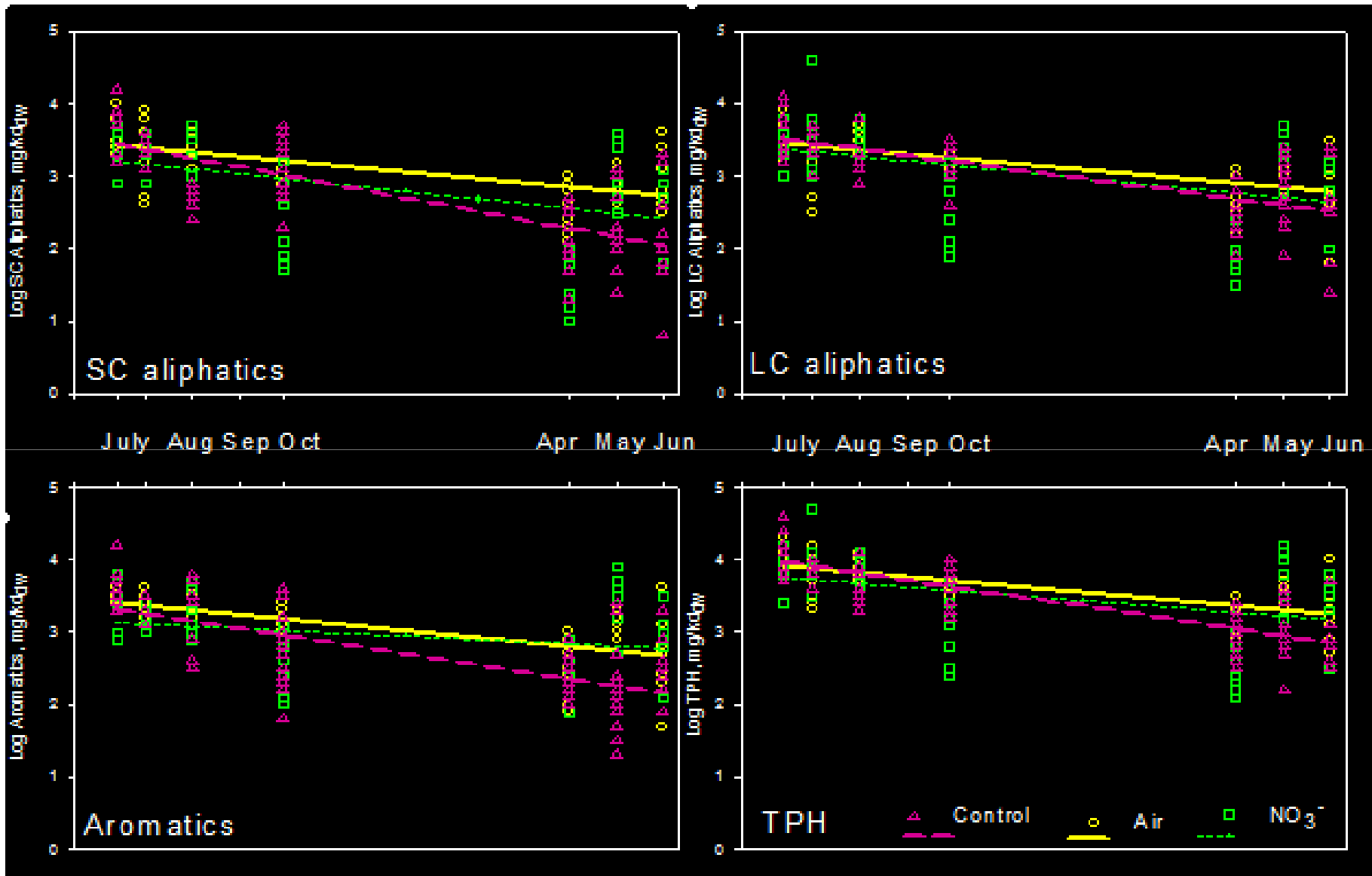
Aire:  $\text{Log } Y = (m + b_1) + (b_3 + b_5)\text{time}$

$\text{NO}_3^-$ :  $\text{Log } Y = (m + b_2) + (b_4 + b_5)\text{time}$ , and

control:  $\text{Log } Y = m + b_5\text{time}$



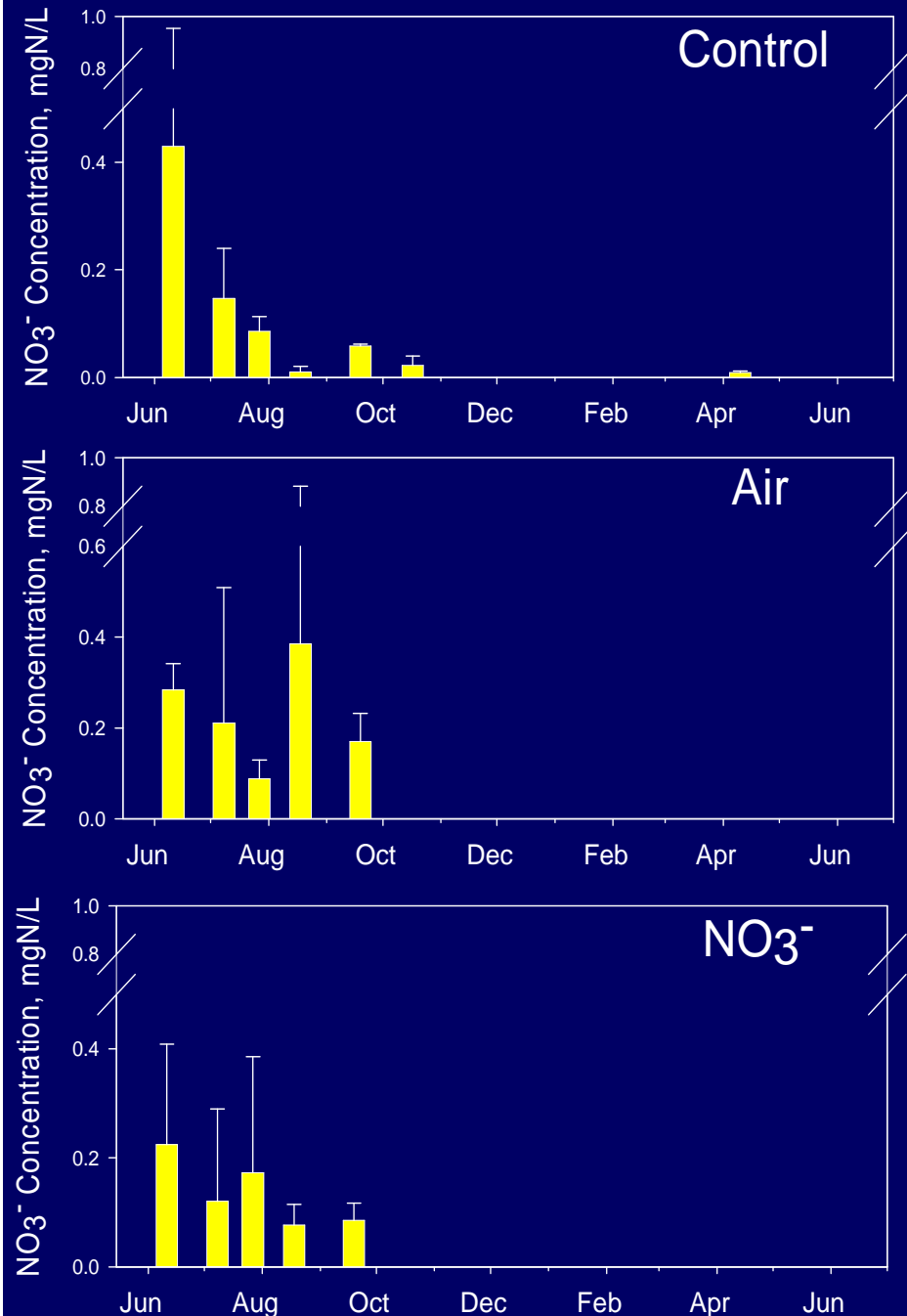




## Tratamientos con reducción significativa ( $p < 0.2$ ) y sus tasas de biodegradación ( $\text{mg}/\text{kg}_{\text{dw}}/\text{d}+2\text{s}$ )

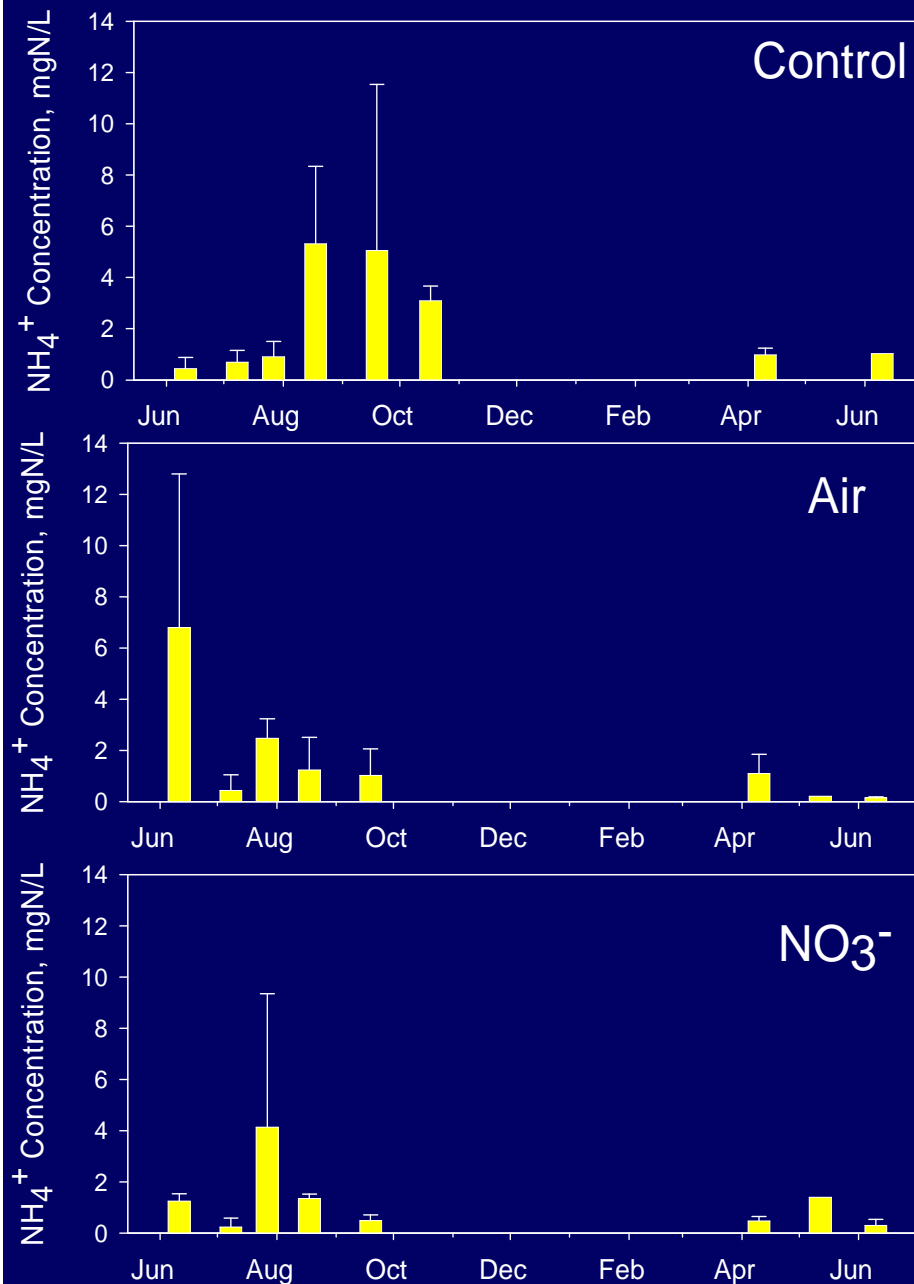
	Verano, otoño	primavera	Total
SC aliphatics	Cont. ( $13.1 \pm 12.8$ ) Air ( $27.6 \pm 17.5$ ) $\text{NO}_3^-$ ( $20.6 \pm 10.9$ )	----	Control ( $7.8 \pm 2.1$ ) $\text{NO}_3^-$ ( $4.7 \pm 2.4$ )
LC aliphatics	$\text{NO}_3^-$ ( $23.7 \pm 13.0$ )	----	Control ( $3.0 \pm 1.0$ )
Aromatics	Cont. ( $19.2 \pm 11.2$ ) Air ( $16.9 \pm 9.9$ )	----	Control ( $6.9 \pm 4.8$ ) $\text{NO}_3^-$ ( $4.5 \pm 3.3$ )
Color indicates degradation rates greater than control			

# NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N agua de poro



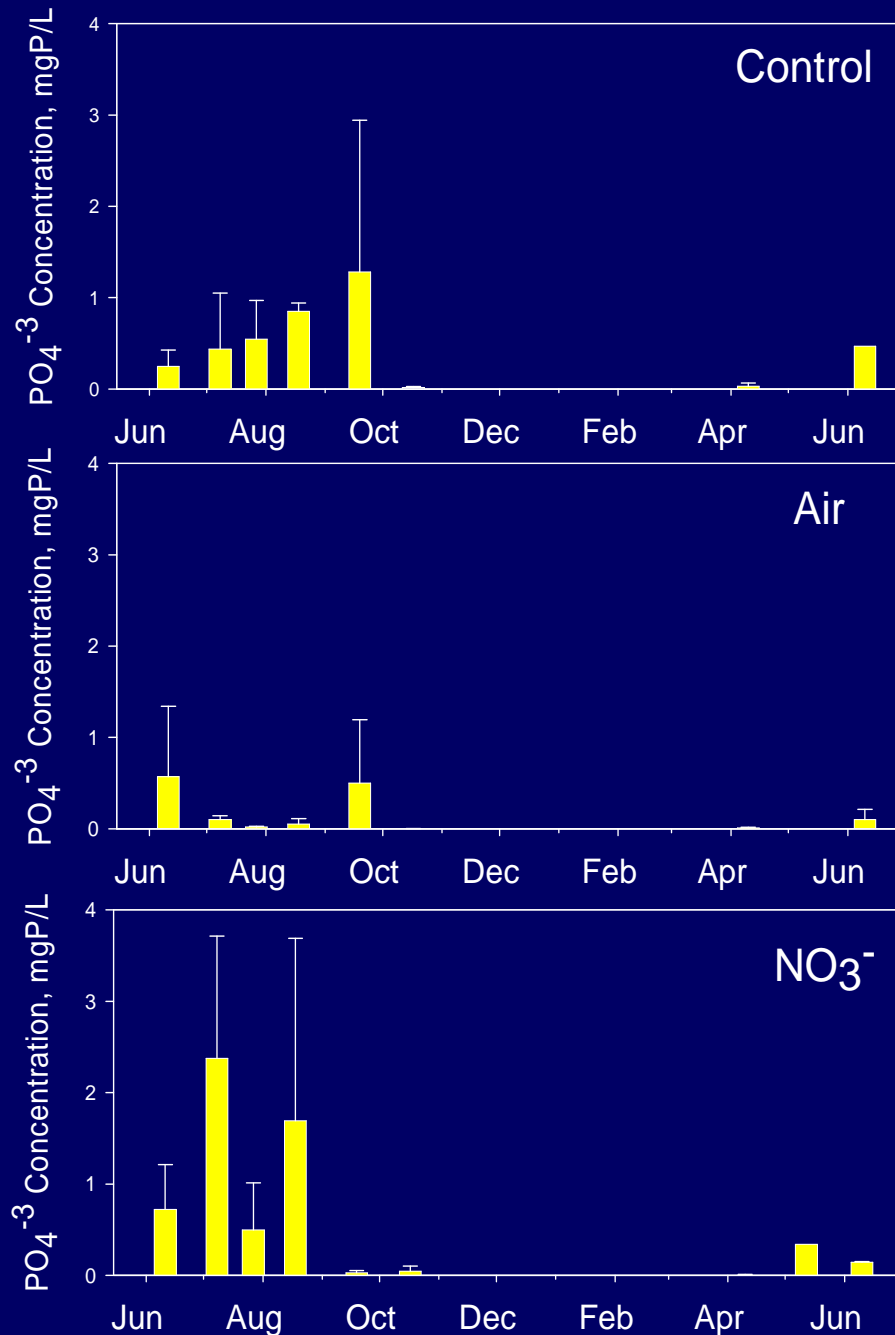
- Concentraciones muy variables
- Concentración *in situ* de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> baja en el plot para mantener desnitrificación
- 32 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N /L concentración objetivo
- Con base en la estequiometría solamente ~11% fue inyectado

# $\text{NH}_4^+\text{-N}$ agua de poro



- Concentraciones muy variables
- Mayor concentración en la marisma por las condiciones de reducción
- Baja concentración como nutrientes para mantener la biorremediación

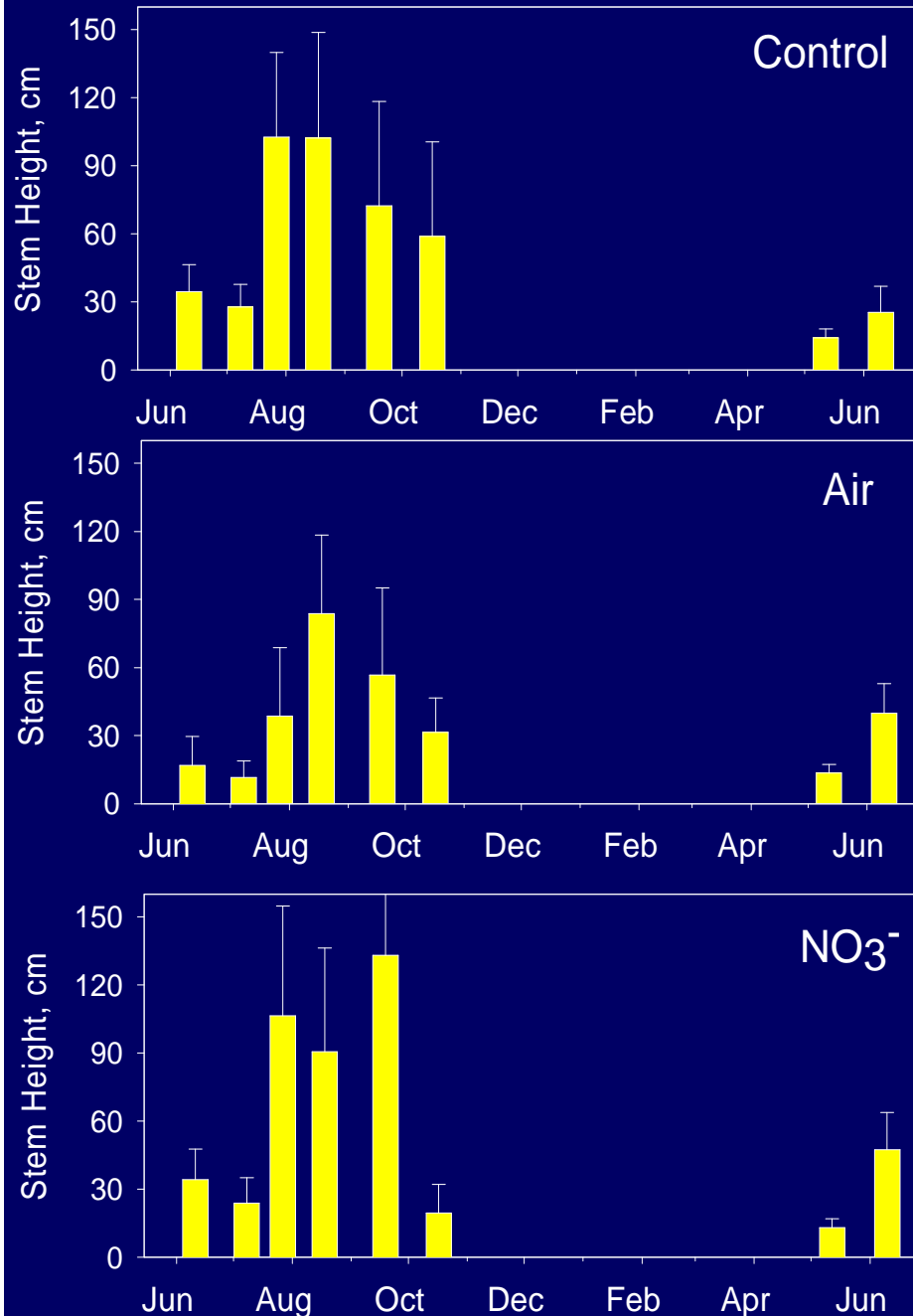
# $\text{PO}_4^{-3}\text{-P}$ agua de poro



- Concentraciones muy variables
- El control y la parcela del  $\text{NO}_3^-$  presentaron altas concentraciones al final de 1998 seguido de una caída drástica
- Plot de aire tuvo menor concentración en espacio intersticial

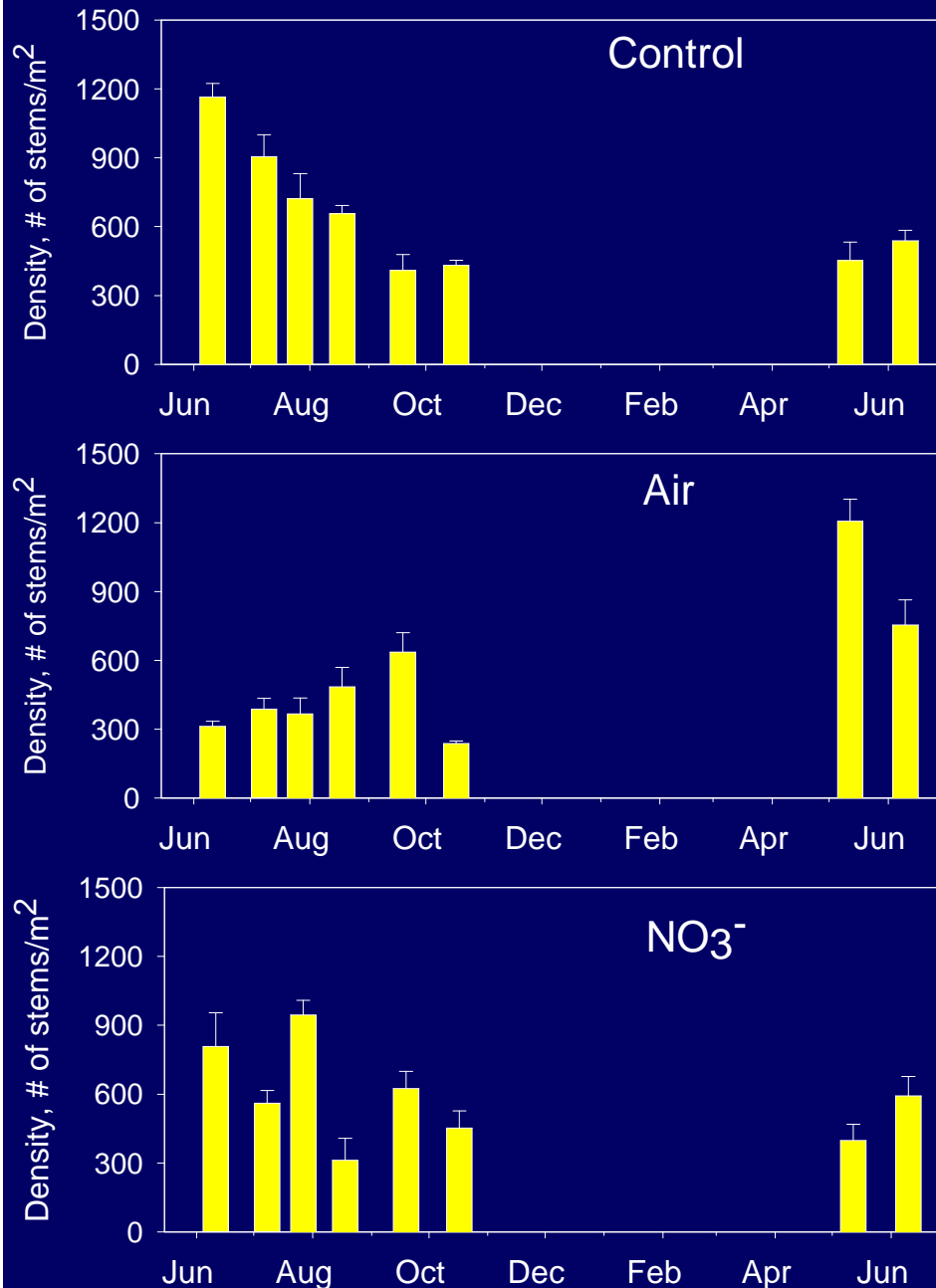
# *S. Alterniflora*

## Altura del tallo



- Patrón estacional de crecimiento
- Acondicionamiento no tuvo un efecto sig.
  - IVRM analysis
- No hay relación entre altura y degradación de SC, alifáticos LC ó aromáticos

# Densidad de *S. Alterniflora*



- NSD entre control y tratamientos
- Mayores densidades cuando hay plantas pequeñas
- No hay relación entre densidad y degradación



# Resultados

- Pendientes negativas por el IVRM indicaron una reducción de TPHs durante 1998 y todo el estudio (1998-1999)
- La biodegradación fue considerada como el proceso principal
- Durante el verano y otoño el aire degradó significativamente los SC mientras que el  $\text{NO}_3^-$  degradó alifáticos SC y LC
- Durante la primavera no se observó degradación significativamente mayor a Atenuación natural.
- Durante el año ninguno de los tratamientos presentó una tasa de biodegradación significativamente mayor a la del control (AN) para las diferentes fracciones de TPHs

# Factores limitantes de la biodegradación

- Presencia de fracciones arcillosas ó húmicas lo que ocasionó que los TPHs fueran menos biodisponible
- Rápida utilización de ATEs para degradar materia orgánica natural y oxidación de sulfitos reducidos
- Baja concentración *in situ* de N en espacios intersticiales
- TPH más resistentes a biodegradación
- Cobertura vegetal de *S. alterniflora*

# Limitaciones ingenieriles I

- Tratamientos: adición homogénea?
- Solución  $\text{NO}_3^-$  : rutas de menor resistencia?
  - a la superficie
  - Después de remover tubería metálica durante instalación
- Permeabilidad limitada del gas a través de los sedimentos

# Limitaciones ingenieriles II

- Limitación en la transferencia de masas
  - Baja solubilidad de TPH
  - Baja temperatura
  - Mezcla limitada
- Uso de bajas concentraciones de los tratamientos

# Conclusiones I

- Sedimentos de la marisma muy complejos
  - Alta variabilidad espacial
  - Alta heterogeneidad de condiciones (e.g., sedimentos finos y raíces)
- Interferencias MON
- Durante todo el estudio los TEAs no mejoraron degradación *in situ* de TPH respecto a la atenuación natural
- Bajas concentraciones *in situ* de N y limitación en transferencia de masa pudieron ser los principales factores que afectaron biodegradación de TPH *in situ*



[fabio.rolan@javeriana.edu.co](mailto:fabio.rolan@javeriana.edu.co)

**GRACIAS**