

Informe preliminar sobre el estado de conservación de los suelos agrícolas del delta del río Senegal.

Autor: Manuel Antonio González Pérez (profesor del Área de Ingeniería Agroforestal de la Sección de Ingeniería Agraria).

Introducción:

El consumo de arroz por parte de la población de Senegal hace que sea un alimento básico, para el año 2000 el dato es de 115 kg de arroz por persona. A pesar de la producción propia, se hace necesario la importación de este cereal, por lo que no tienen garantizada la soberanía alimentaria.

En el delta del río Senegal se encuentran dos tercios de los arrozales que, junto con los del resto del país, se encargan de producir unas 350.000 t de arroz al año; por otro lado, para completar el consumo propio deben importar aproximadamente 1.500.000 t de arroz al año (Euronews, 2016).

Para tratar de alcanzar la soberanía alimentaria, se hace necesario el estudio del estado de conservación de los suelos del delta del río Senegal. Esto es imprescindible si se quiere aumentar la superficie de cultivo y mejorar la productividad de los mismos.

Para determinar el estado de conservación de los suelos, es fundamental la toma de datos preliminares sobre la resistencia a la penetración y el estado de humedad, junto con el análisis de una muestra de suelo, en una parcela representativa en la que se cultive arroz. Para la realización de estos trabajos, se selecciona una superficie dentro de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

Para la toma de datos y de la muestra de suelo se recurrió a las actividades que deberían realizar dos alumnas del Departamento de Filología Clásica, Francesa, Árabe y Románica, de la Universidad de La Laguna, dentro del viaje programado de intercambio comprendido en el proyecto AGRO_FEM, código MAC2/2.3d/292. Estas alumnas contaron con la colaboración de las cooperativistas de la GIE de Ross-Béthio.

Materiales y métodos:

Para la toma de muestra de suelo que se va a someter a un análisis físico-químico completo, se toman de 10 a 20 submuestras de unos pocos gramos en la parcela seleccionada, siguiendo un recorrido en zigzag sobre la misma entre submuestra y submuestra, de forma que se recorra toda la superficie (Figura 1).

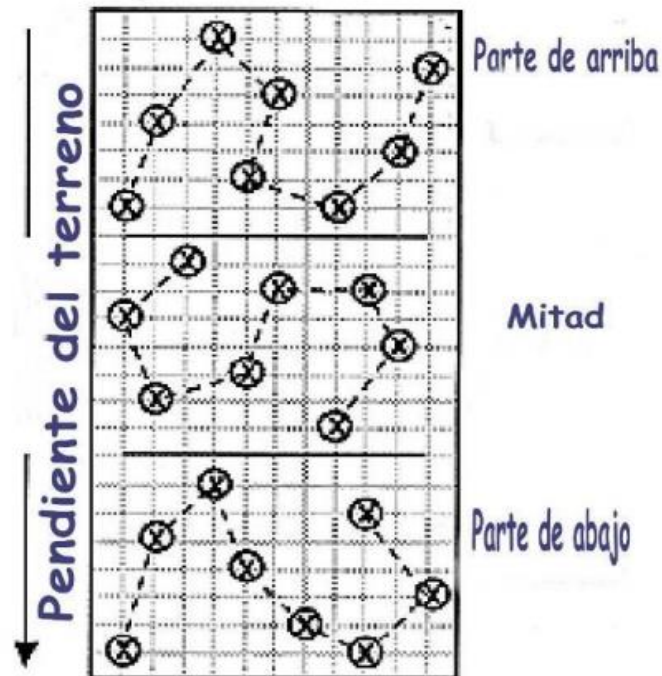


Figura 1: Toma de submuestras en la parcela.
Fuente: Santos, B. *et al.*, 2017.

Las submuestras se obtienen con una pala a una profundidad de 20-30 cm y se mezclan en un cubo de forma que se obtenga una muestra final de suelo homogénea de 1 a 1,5 kg que sea representativa de la parcela (Santos, B. *et al.*, 2017).

Se seleccionan tres parcelas en la Cooperativa GIE de Ross-Béthio, de unos 3.000 m² cada una aproximadamente, con diferentes condiciones de humedad en el suelo. La muestra única se obtiene de estas tres parcelas.

Para tomar datos sobre la resistencia a la penetración del suelo se utiliza un penetrómetro de la marca Eijkelkamp, de accionamiento manual (Figura 2).

El aparato se compone de un cono instalado en el extremo de una varilla con una extensión, que conecta con un émbolo y cabezal de medición en el extremo opuesto y que dispone de unas manceras para su utilización.

La persona que manipule el aparato debe aplicar una presión uniforme, clavando verticalmente el cono en el suelo, a una velocidad constante recomendada de 2 cm/s. Las lecturas se toman cada 5 cm de profundidad, entre 0 y 100 cm, probablemente hay una profundidad a partir de la cual las fuerzas se salen del rango de medición.

El rango de mediciones es de 100 a 1000 N, las mediciones de 0 a 100 N están sin subdividir por su baja fiabilidad, las mediciones de 100 a 200 N tienen una desviación media de +/- 15%, las mediciones de 200 a 700 N tienen una desviación media de +/- 8%, es este rango el recomendado para un uso prolongado y fiable, las mediciones de 700 a 1000 N desgastan y acortan el tiempo de uso del aparato, por lo que se desaconseja.



Figura 2: Penetrómetro de la marca Eijkelkamp, de accionamiento manual.
Fuente: Elaboración propia.

Para cada lectura, el indicador del cabezal de medición dispone de un puntero negro en el manómetro, que arrastra al puntero de lectura máxima rojo que se queda anclado, dando éste la resistencia máxima obtenida en esos 5 cm.



Figura 3: Juego de conos del penetrómetro Eijkelkamp.
Fuente: Elaboración propia.

El aparato dispone de 4 conos circulares de acero inoxidable (Figura 3), con una conicidad de 30° y con el eje de simetría centrado para su manipulación, según la norma ASAE S313.3 FEB1999ED, que se diferencian en el área de la base y el diámetro (Tabla 1):

Tabla 1: Características de los conos.
Fuente: Eijkelkamp, 2018.

CONO	AREA BASE cm ²	DIÁMETRO mm
Nº1	1	11,28
Nº2	2	15,96
Nº3	3 1/3	20,60
Nº4	5	25,23

Para poder expresar los resultados de resistencia a la penetración en N/cm², las lecturas se realizan en N y se dividen por el área de la base del cono utilizado en cm². La última calibración es del 14-12-2018 y el aparato queda dentro de la desviación media de +/- 8%.

Tabla 2: Calibración del equipo.
Fuente: Eijkelkamp, 2018.

Valor nominal (N)	Valor de lectura (N)	Desviación estándar (%)
200	216	8
400	406	3
600	590	5

Una vez que se obtiene una lectura (p.e. de 460 N) con un cono determinado (p.e. el Nº4), se debe dividir por el área de la base (p.e. 5 cm²) para obtener la resistencia de cono (p.e. 92 N/cm²).

Según la norma ASAE EP542 FEB1999, los resultados deben expresarse en MPa para el índice de cono (CI) y en m para la profundidad (D).

Para tomar datos sobre el estado de humedad del suelo se utiliza una sonda de la marca IMKO TRIME-PICO 64/32, con dos varillas y tecnología Time Domain Reflectometry (TDR) (Figura 4). La capacidad de penetración de las líneas de flujo eléctrico y magnético, para esta sonda, es de unos 2 cm alrededor de las varillas de la sonda. Dispone también de un medidor portátil HD2, para el control de la sonda, con una pantalla para las lecturas y batería recargable (Figura 5). Las lecturas van de 0 a 100 % en volumen del contenido de humedad en el suelo.

La persona que manipule el aparato debe preparar los agujeros de las varillas de la sonda previamente, mediante una plantilla, para evitar que se doblen si se

introducen forzando las varillas contra el suelo compactado y, una vez introducidas, se debe compactar el suelo manualmente alrededor de las varillas.

Los resultados de esta sonda informan del contenido de agua en l/m^3 , en % gravimétrico y % volumétrico. Para este informe se toman los datos en % volumétrico.



Figura 4: Sonda de la marca IMKO TRIME-PICO 64/32.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5: Control de la sonda portátil HD2.
Fuente: Elaboración propia.

El calibrado de la sonda se realiza en la Sección de Ingeniería Agraria de la Universidad de La Laguna, para ello es necesario tomar 20 submuestras de 1kg aproximadamente con lo que la muestra final es de 20 kg (Schweizer, S. 2011).

Con la muestra final de suelo se llenan 4 macetas de 5 litros cada una colocadas sobre una rejilla de drenaje y se procede al riego de las mismas, la primera al 100% de saturación, la segunda al 75%, la tercera al 50% y la cuarta a 25%.

Las macetas permanecen en drenaje durante 24 horas, para obtener 4 condiciones de humedad de suelo distintas. Se toman datos con la sonda de humedad del suelo IMKO TRIME-PICO 64/32 y con el medidor portátil HD2, 2 lecturas en cada maceta, en total 8 lecturas.

Para seguir con el proceso de calibrado, se extraen 2 muestras de suelo de cada una de las 4 macetas, mediante cilindros o anillos del tipo Kopecky, en total se extraen 8 muestras con diferentes estados de humedad de suelo. Cada cilindro contiene un volumen de muestra de suelo de 100 cm³ (para el agua se toma una densidad de 1 g/cm³).

Finalmente se realiza un procedimiento de doble pesada, interponiendo entre ambas el acondicionamiento de las 8 muestras en una estufa para el desecado a 105-110 °C durante 24 horas. En la Tabla 3 se recogen los datos y resultados de la doble pesada y las lecturas de la sonda.

Tabla 3: Datos recogidos para el calibrado de la sonda de humedad.
Fuente: Elaboración propia.

Peso de suelo en cada muestra de 100 cm³				Lecturas en sonda
Peso húmedo W (g)	Peso seco Ws (g)	Peso agua Ww (g)	H (%) = [Vw(m³)/V(m³)] 100	Sonda IMKO TRIME-PICO 64/32 H (%) ó (m³/m³) 100
170,43	109,44	60,99	60,99	37,05
170,30	112,75	57,55	57,55	36,52
164,71	118,54	46,17	46,17	27,52
165,60	122,74	42,86	42,86	27,44
129,46	102,24	27,22	27,22	10,55
151,52	122,75	28,77	28,77	10,52
125,52	104,22	21,30	21,30	9,58
133,80	111,13	22,67	22,67	9,63

Seguidamente, se construye una gráfica (Figura 6) con los resultados de la humedad obtenidos con la lectura en sonda y con el ensayo de doble pesada, expresados en (%) ó (m³/m³), que permite observar la correlación que existe entre ambos, con un coeficiente de correlación alto.

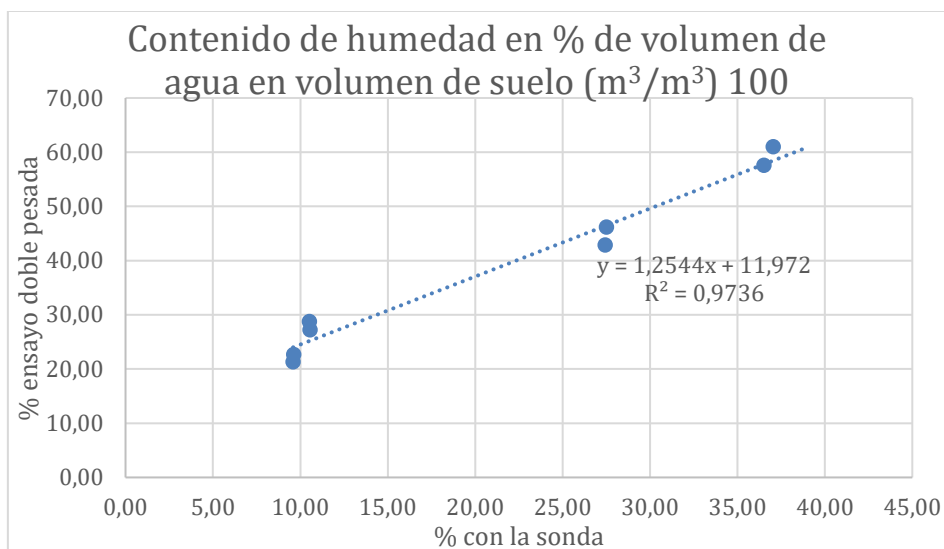


Figura 6: Correlación entre los datos de laboratorio y los de la sonda.
 Fuente: Elaboración propia.

La toma de muestra de suelo y la primera medición se realizó el 26/01/2023 y las dos mediciones siguientes se realizaron el 28/01/2023. El personal técnico que intervino lo componían las alumnas de la Facultad de Filología Francesa de la Universidad de La Laguna, D^a Marcela María Arias Vega y D^a Laura Bethencourt Maguet (Figuras 7 y 8).

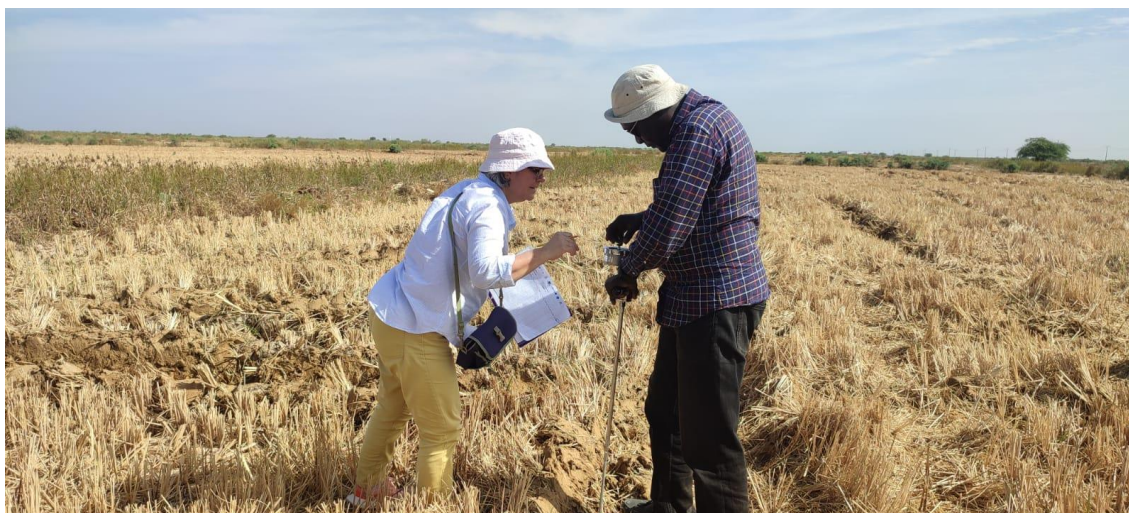


Figura 7: Toma de datos de resistencia a la penetración en las parcelas de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.
 Fuente: Elaboración propia.



Figura 8: Toma de datos de humedad del suelo en las parcelas de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se espera determinar para cada una de las tres parcelas, cómo evoluciona la fuerza de penetración en el suelo cada 5 cm, hasta la profundidad que se pueda alcanzar manualmente. A partir de estos datos se puede representar una gráfica con el Índice de Cono (Cone Index) en MPa y con la profundidad (Depth) en cm, lo que permite deducir el estado de compactación del suelo.

Estas experiencias se realizan midiendo el estado de humedad del suelo en cada una de las parcelas, que será distinto, y podrá permitir deducir como varía el estado de compactación en función del contenido de humedad del suelo.

Resultados:

Tabla 4: Datos obtenidos con el penetrómetro en la parcela 1 de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

CONO Nº: 2		FECHA: 26/01/23 10 a.m				COORDENADAS DEL LUGAR DE MEDICIÓN: 16,3290448, - 16, 042792				
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
5		330						900	890	390
10		530	700	550	690	600	600	900	530	520
15		820	700	560	810	700	400	420	420	600
20	720	800	490	300	910	490	500	350	500	650
25	720	790	550	390	850	420	400	400	490	520
30	500	700	400	550	450	430	310	320	400	400
35	360	400	300	600	390	400	310	250	420	500
40	200	300	300	590	390	390	310	320	490	390
45	190	390	290	400	310	280	310	350	590	450
50				400				430	600	450
55									790	

Tabla 5: Datos obtenidos con la sonda de humedad en la parcela 1 de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)
5	57,56	TIERRA MUY DURA.	73,28	76,28	117,70	236,52	148, 85	151,40	134,15	361,28
20	TIERRA MUY DURA.	TIERRA MUY DURA.	161,23	166,84	305,60	353,57	451,15	312,39	358,25	376,56
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)
5	2,46	4,02	3,316	3,026	5,03	9,68				
20	TIERRA MUY DURA.	6,74	6,89	7,13	13,06	15,11				

OBSERVACIONES: Parcela desnivelada, sin cultivar desde hace 3 meses. Parcela con nivel de humedad muy bajo, la tierra estaba muy seca y dura. Suelo cubierto de hierba seca. Al estar tan duro el terreno y no contar con las herramientas apropiadas, no se pudo obtener la muestra a más de 5 – 10 cm de profundidad.

Tabla 6: Datos obtenidos con el penetrómetro en la parcela 2 de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

CONO Nº: 3		FECHA: 28/01/23 10:00h				COORDENADAS DEL LUGAR DE MEDICIÓN: 16,3308977, -16,0542152				
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
5	220	200	290	402	950	400	120	200	500	120
10	300	100	320	400	220	250	150	200	350	200
15	320	195	400	400	300	300	200	220	100	200
20	300	290	320	320	220	320	220	290	120	200
25	290	250	300	290	200	300	250	320	200	250
30	300	250	300	220	600	250	250	320	250	260
35	240	290		300	850	300	290	450	300	320
40	300	320		300		250	300	650	290	460
45	490	320		500		300	300		280	700
50	1000	500		900		420	800		220	
55		900				790			300	

Tabla 7: Datos obtenidos con la sonda de humedad en la parcela 2 de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)
5	157,95	180,18	198,67	198,43						
20	365,74	329,00	360,36	BATERÍA DESCARGADA						
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)
5	6,75	7,70	8,49	8,48						
20	15,63	14,06	15,40	BATERÍA DESCARGADA						

OBSERVACIONES: Parcela cultivada y muy húmeda. Regada a las 7 a.m. Parcela regada gracias a una bomba de agua del canal, movida por placas solares.

Tabla 8: Datos obtenidos con el penetrómetro en la parcela 3 de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

CONO N°: 3		FECHA: 28/01/23 12:45 p.m				COORDENADAS DEL LUGAR DE MEDICIÓN: 16,3308977, - 16,0542152				
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
5	220	150	100	100	0	100	150	150	200	100
10	290	290	110	220	200	200	290	290	220	260
15	300	310	200	290	220	190	290	290	300	250
20	320	350	220	220	250	200	250	250	290	290
25	290	350	290	250	290	220	220	300	350	300
30	290	300	220	220	310	250	300	300	350	300
35	320	250	200	220	390	290	350	320	400	250
40	390	220	220	300	380	290	800	300	520	450
45	300	390	300	500	690	800		500		700
50	900	420	500							
55		690								

Tabla 9: Datos obtenidos con la sonda de humedad en la parcela 3 de la Cooperativa GIE de Ross-Béthio.

MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)
5	176,20	251,78	147,19	189,54	242,19	234,49	209,43	180,41	222,53	217,62
20	254,36	239,86	227,92	218,19	282,44	268,58	386,80	283,14	316,54	285,48
MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)
5	7,53	10,76	6,29	8,10	10,35	10,02	8,95	7,71	9,51	9,30
20	10,87	12,43	9,74	9,32	12,07	11,22	16,53	12,10	13,54	12,20
PARCELA: Cooperativa GIE de Ross-Béthio.										
OBSERVACIONES: Parcela con grado de humedad medio. Muestras tomadas casi 6h después del riego, y 2h después de la segunda medida.										

A partir de estas tablas se determinan los valores promedio de las fuerzas (N) para cada profundidad (cm), seguidamente se calculan los valores de Cone Index (MPa) utilizando la superficie del cono empleado en cada toma de datos y para cada profundidad (m) según la norma ASAE EP542 FEB1999 (Tablas 4, 6 y 8).

También se determinan los valores promedio de la humedad (%) como volumen de agua en volumen de suelo (m^3/m^3) 100, utilizando la recta de correlación que se obtuvo durante el calibrado de la sonda. Se emplean los datos para 20 cm de profundidad ya que son los más fiables para evitar la disminución por evaporación en superficie (Tablas 5, 7 y 9).

Finalmente, con los valores promedio se obtienen las siguientes gráficas:

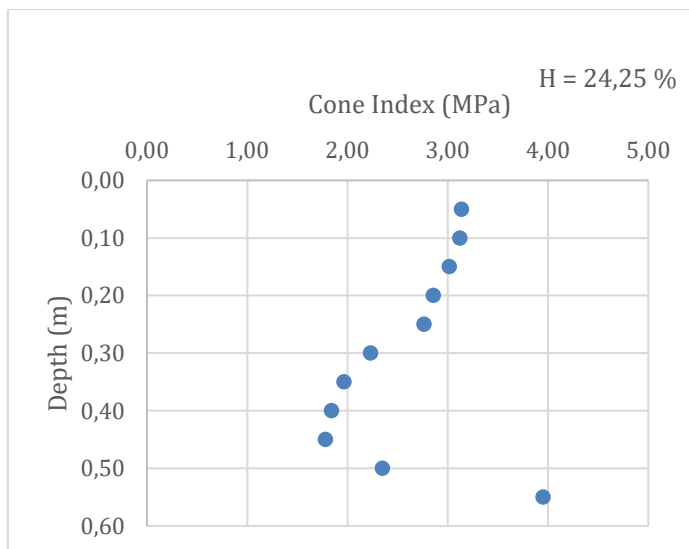


Figura 9: Gráfica de Profundidad-Índice de Cono para una humedad del 24,25 % de volumen de agua en volumen de suelo (m^3/m^3) 100, correspondiente a la parcela de toma de datos 1.

En esta parcela la resistencia tiene un valor de 3,14 kPa en superficie, 5 cm, que disminuye con la profundidad hasta un valor mínimo de 1,78 kPa que corresponde a 45 cm, partir del cual vuelve a aumentar bruscamente hasta 3,95 kPa como valor máximo correspondiente a 55 cm. Esto indica la presencia de una costra superficial de unos 20 cm y una suela difícil de romper a partir de los 50 cm (Figura 9).

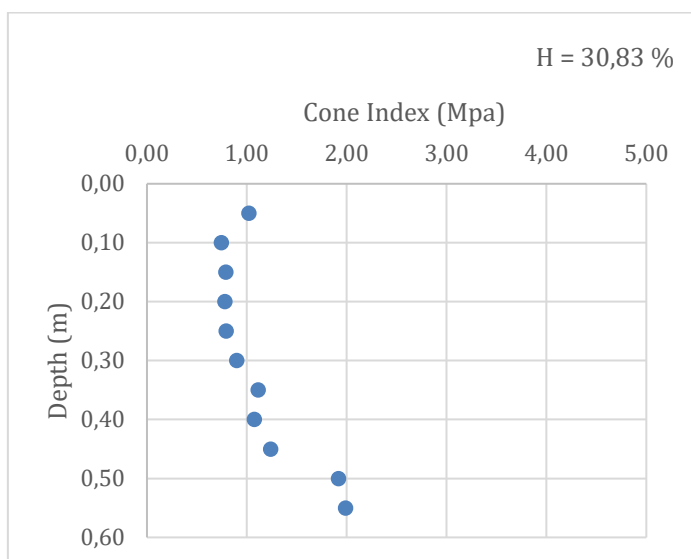


Figura 10: Gráfica de Profundidad-Índice de Cono para una humedad del 30,83 % de volumen de agua en volumen de suelo (m³/m³) 100, correspondiente a la parcela de toma de datos 2.

En esta parcela la resistencia tiene un valor de 1,02 kPa en superficie, 5 cm, que disminuye ligeramente con la profundidad hasta unos valores mínimos que varían entre 0,75 y 1,24 kPa hacia los 45 cm, partir del cual vuelve a aumentar bruscamente hasta 1,99 kPa como valor máximo correspondiente a 55 cm. Esto indica la presencia de una costra superficial de unos 10 cm y una suela difícil de romper a partir de los 50 cm (Figura 10).

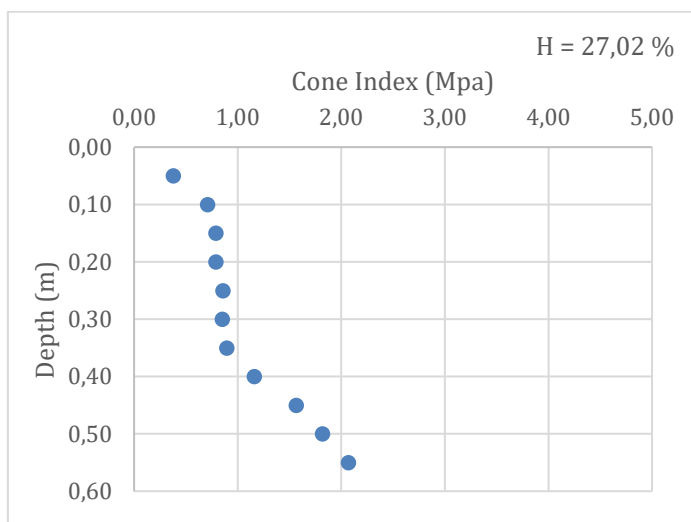


Figura 11: Gráfica de Profundidad-Índice de Cono para una humedad del 27,02 % de volumen de agua en volumen de suelo (m³/m³) 100, correspondiente a la parcela de toma de datos 3.

En esta parcela la resistencia tiene un valor de 0,38 kPa en superficie, 5 cm, que aumenta ligeramente a partir de los 10 cm con unos valores entre 0,71 y 0,90 kPa hasta los 35cm de profundidad, a partir de aquí aumenta bruscamente hasta 2,07 kPa como valor máximo correspondiente a 55 cm. Esto indica la ausencia de costra superficial de unos 10 cm y una suela difícil de romper a partir de los 50 cm (Figura 11).

La muestra de suelo obtenida se llevó al Centre de Recherches Agricoles de Saint-Louis del Institut Senegalais de Recherches Agricoles (ISRA). Se realizó un análisis completo (Tabla 10). La fecha de entrega de los resultados del laboratorio fue el 08-05-2023.

Tabla 10: Resultado del análisis de suelo. Fuente: ISRA.

N°	Nom échantillon	pH eau (1/2,5)	pH KCl (1/2,5)	CE ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)(1/2,5)			
1	GIE Ross Béthio	6,32	5,61	2.530			
pH: potentiel hydrogène ; CE : Conductivité Electrique							
pH	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7 7.5 8 8.5
Degré	Trés acide	Acide		Peu acide	Neutre	Peu alcalin	Alcalin
Conductivité électrique				Niveau de salinité			
>4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$				Sol extrêmement salé			
2000-4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$				Sol très salé			
800-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$				Sol Moyennement salé			
400-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$				Sol Légèrement salé			
<400 $\mu\text{S}/\text{cm}$				Sol non salé			
N°	Nom échantillon	C (%)	N (%)	C/N	MO (%)	Pass (ppm)	
1	GIE Ross Béthio	0,179	0,029	6,131	0,308	2,480	
C: Carbone N: Azote MO: Matière organique Pass: Phosphore assimilable							
N°	Nom échantillon	Na ⁺ (meq/100g)	K ⁺ (meq/100g)	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100g)	CEC (meq/100g)	
1	GIE Ross Béthio	4,621	0,266	2,787	0,900	9.205	
Na: sodium K: potassium Ca: calcium Mg: magnesium							
N°	Nom échantillon	Fe ²⁺ (ppm)	Mn ²⁺ (ppm)	Cu ²⁺ (ppm)	Zn ²⁺ (ppm)		
1	GIE Ross Béthio	0,131	trace	0,024	trace		
Fe: fer Mn: manganèse Cu: cuivre Zn: zinc							
N°	Nom échantillon	% L	% A	% SG	% SM	% SF	Texture
1	GIE Ross Béthio	12,5	8,2	1,0	6,5	71,8	Sable limoneux
L: limon A: argile SG: sable grossier SM: sable moyen SF: sable fin							

Conclusiones:

Como era de esperar, la mayor resistencia, Índice de Cono, se presenta en la parcela de menor contenido de humedad, seguida de la parcela de contenido medio y finalmente a de mayor contenido.

La presencia de costra es importante en la parcela de menor contenido de humedad; sin embargo, en las otras parcelas el comportamiento de la costra no es el esperado, probablemente por el poco tiempo de espera entre los riegos y la toma de datos, aunque la parcela de mayor contenido de humedad indica la presencia de una costra de resistencia ligera que no debería estar.

En las tres parcelas se observan los valores máximos de Índice de Cono a partir de una profundidad de 50 cm, lo que indica la presencia de una suela de labor difícil de romper, probablemente generada por el paso de la maquinaria, llegando a un valor de 3,95 kPa para 55 cm de profundidad en la parcela 1, que es la de menor contenido de humedad.

La suela aparece a los 50 cm de profundidad, en la parcela 2 se observa un valor de 1,92 kPa para 30,83 % de humedad, en la parcela 3 se observa un valor de 1,82 kPa para 27,02 % de humedad y en la parcela 1 se observa un valor de 2,35 kPa para 24,25 % de humedad.

Esto indica que para disminuir la presencia de la suela tienen que aumentar los contenidos de humedad por encima de estos valores, ya que la diferencia observada es mínima.

Tabla 11: Resultados obtenidos para 20 cm de profundidad

Depth (mm)	Moisture content (%)	Cone Index (MPa)
200	24,25	2,86
200	27,02	0,79
200	30,83	0,78

Los valores de Índice de Cono, entre otros factores, dependen de la composición del suelo y si mantienen o no labranza convencional.

Se pueden comparar estos datos con los resultados obtenidos a 200 mm de profundidad en las experiencias realizadas en suelos de Manitoba (Canadá) (Tabla 12), para parcelas ubicadas en Brandon, suelos sin labranza NT (No-tillage) y en Oakville, suelos con labranza convencional CT (Conventional tillage).

Tabla 12: Cone Index para suelos en Manitoba (Canadá).
Fuente: Kumar, A. *et al.*, 2012.

	Moisture content (%)	Cone Index (MPa)	Sand: arena (%)	Silt: limo (%)	Clay: arcilla (%)
Brandon No-tillage	23,15	2,23	36	32	32
	27,82	1,87	34	30	36
	30,61	1,63	31	36	33
		Promedio:	33,67	32,67	33,67
Oakville Conventional tillage	25,02	0,20	4	19	77
	27,13	0,43	4	19	77
	30,19	0,62	4	19	77
		Promedio:	4,00	19,00	77,00

Si se realiza una comparación con los resultados obtenidos en nuestras parcelas con la tabla anterior, para 200 mm de profundidad y la humedad más próxima, se puede observar que los Índices de Cono obtenidos en ambas experiencias difieren bastante, por lo que se puede decir que estos valores dependerán de la composición del suelo y si se realizan técnicas de no-laboreo o labranza convencional.

Del análisis físico-químico del suelo hay que destacar los resultados del pH y la conductividad. Para determinar el pH del suelo y la conductividad, se realiza una suspensión de 20 g de "tierra fina" en 50 ml de agua destilada (1/2,5).

La conductividad es de $2.530 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ que corresponde a un suelo muy salado (Tabla 10), según Hurtado *et al.* (2021) corresponde a un suelo salino.

El resultado del pH es 6,32 que corresponde a un pH ácido bajo (Tabla 10), según Hurtado *et al.* (2021) corresponde a un suelo levemente ácido. Este dato indica que en el suelo hay una predominancia de cationes de hidrógeno. Para el caso del delta del río Senegal, probablemente debido a una pluviosidad abundante y a la técnica de riego por inundación empleada en los arrozales.

En la analítica se observa que el resultado del C (%) es 0,179 (Tabla 10). Este tipo de suelos con cantidades inferiores a un 0,5% de C orgánico son característicos de zonas desérticas.

Datos importantes son la cantidad de nitrógeno 0,029% y la relación C/N 6,131 (Tabla 10), según Hurtado *et al.* (2021) es un suelo muy pobremente provisto de N y la capacidad de mineralización o producir nitratos es alta. De la escasa Materia Orgánica, MO (%) = 0,308, según Hurtado *et al.* (2021) también es un suelo muy pobremente provisto, se deduce la carencia de microorganismos que fijen el nitrógeno, por lo que no hay presencia de nitrógeno amoniacal (orgánico) ni nitrógeno nítrico (mineral).

Para el N también puede influir una pluviometría abundante y la técnica de riego por inundación empleada en los arrozales. Sirva como ejemplo que las necesidades de N para el arroz que se cultiva en España, para obtener un rendimiento de 5-7 t/ha con las dosis habituales de fertilizantes aplicadas, son de 20-24 ‰.

El resultado del P asimilable es de 2,480 ppm con el método de extracción Olsen modificado según Dabin (Tabla 10), por debajo de 10 ppm se considera bajo contenido (Cropaia, 2023). Según Hurtado *et al.* (2021) también es un suelo muy pobremente provisto. Según Urbano Terrón (1989) es un suelo pobre.

El resultado del Na⁺ es de 4,621 (meq/100g) con el método de extracción Acetato de amonio (Tabla 10); es decir, de 1.062,3679 ppm. Según Cropaia (2023) se considera excesivo. Es un indicador de salinidad excesiva.

El resultado del K⁺ es de 0,266 (meq/100g) con el método de extracción Acetato de amonio (Tabla 10); es decir, de 104,006 ppm. Según Urbano Terrón (1989) es un suelo medio. Según Cropaia (2023) se considera bajo.

El resultado del Ca²⁺ es de 2,787 (meq/100g) con el método de extracción Acetato de amonio (Tabla 10); es decir, de 558,5148 ppm. Según Urbano Terrón (1989) es un muy suelo pobre. Según Cropaia (2023) se considera bajo.

El resultado del Mg²⁺ es de 0,900 (meq/100g) con el método de extracción Acetato de amonio (Tabla 10); es decir, de 109,35 ppm. Según Urbano Terrón (1989) es un suelo pobre. Según Cropaia (2023) se considera medio.

El resultado de la capacidad de intercambio catiónico CEC es de 9.205 (meq/100g) con el método de extracción Acetato de amonio (Tabla 10); es decir, de 1.841×10^3 ppm.

El resultado del Fe²⁺ es de 0,131 ppm (Tabla 10). Según Urbano Terrón (1989) es un suelo pobre.

El resultado del Mn²⁺ es de trazas en ppm (Tabla 10). Según Urbano Terrón (1989) es un suelo pobre.

El resultado del Cu²⁺ es de 0,024 ppm (Tabla 10) y el de Zn²⁺ es de trazas en ppm (Tabla 10), indicadores de la carencia de microelementos.

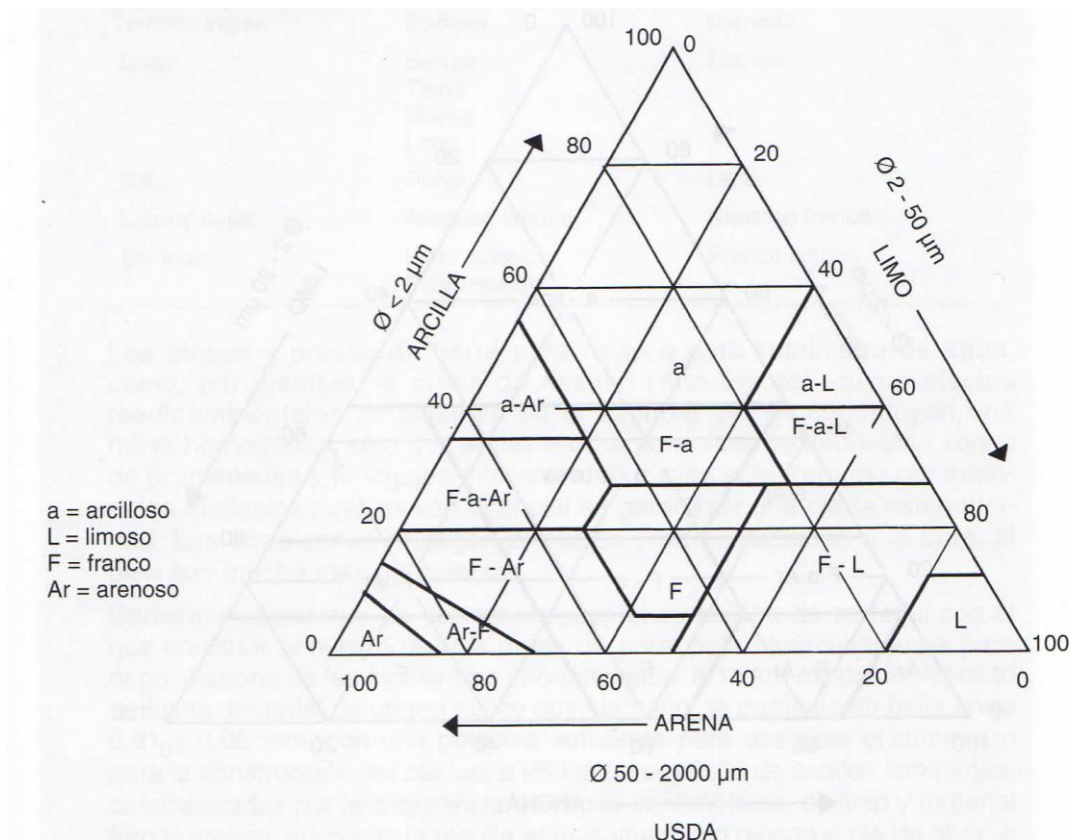


Figura 12: Triángulo de textura USDA (Porta, 2003).

Los resultados de granulometría son los siguientes:

- % L = 12,5 limo
- % A = 8,2 arcilla
- % SG = 1,0 arena gruesa
- % SM = 6,5 arena mediana
- % SF = 71,8 arena fina

Se deduce por la textura que es un suelo arenoso-limoso.

El predominio de la arena fina hace que sea un suelo con un alto riesgo a la erosión eólica.

La baja presencia de limo disminuye el riesgo de erosión alta, de formación de costra superficial y la capacidad de almacenamiento de nutrientes.

Finalmente, la presencia baja de arcillas indica poca fertilidad química y poca dificultad de laboreo y de penetración de las raíces (Porta, 2003).

Recomendaciones:

Para la eliminación de la suela y de la costra superficial, se recomienda una labor de subsolado, previa a la siembra, para una profundidad superior a 60 cm y si es posible con un subsolador de tres brazos enganchado al sistema tripuntal de un tractor de unos 90 cv.

La corrección del pH, en este suelo arenoso con poco complejo (arcilloso-húmico) absorbente de cationes de calcio, se puede solucionar mediante la aportación moderada de calcio (enmienda caliza). (Fuentes, J.L., 1987).

Se recomienda que la dosis de aplicación exacta de la enmienda caliza sea realizada mediante un remolque autobasculante y un esparcidor que se puedan enganchar al sistema tripuntal de un tractor de 90 cv y accionados por su toma de fuerza.

Para incrementar la cantidad de C y Materia Orgánica, se recomienda la incorporación en superficie de los restos de la cosecha, si es posible después de un proceso de compostaje. Si además es posible la aportación de estiércol con el barbecho, mejorarían los resultados.

Se recomienda que la dosis de aplicación exacta de compost o estiércol sea realizada mediante un remolque esparcidor de estiércol enganchado a la barra de tiro de un tractor de 90 cv y accionado por su toma de fuerza.

Para la incorporación de N, es recomendable el cultivo en la parcela y la aportación de un abono verde a base de leguminosas, que permitan la fijación simbiótica del nitrógeno mediante la actividad de las bacterias del género *Rhizobium*. (Fuentes, J.L., 1987).

Se recomienda controlar las dosis de riego para evitar la erosión hidráulica del N y que la incorporación en profundidad del abono sideral se realice mediante una grada de discos doble, con una anchura que permita ser arrastrada y enganchada al sistema tripuntal de un tractor de 90 cv.

La aportación de restos de cosecha o la implantación de un cultivo para abono verde, hacen que disminuya el riesgo a la erosión eólica debido al predominio de la arena fina.

Para la corrección del Na, que es excesivo, probablemente debido a las altas dosis de aplicación de abono mineral, se recomienda calcular las cantidades de abono mineral necesarias y evitar su aplicación manual, recurriendo a la aplicación de las dosis exactas con máquinas abonadoras enganchadas al sistema tripuntal de un tractor de 90 cv y accionadas por su toma de fuerza.

Es posible que la modificación de la salinidad del agua de riego sea debida a la construcción de la presa de Diama en 1986, que alteró el flujo del río Senegal (Colejo Blanco, S. 2017).

Además, la modificación de la salinidad del agua puede ser debida a que en 2003 se creó la “Lengua de Barbarie”, una apertura artificial que evitara inundaciones en la isla de Saint Louis (Oumar y Romagosa, 2013).

La posibilidad de la salinización por intrusión marina es difícil de entender debido a que las parcelas se encuentran a unos 100 km de la costa, aunque la cota no es muy alta.

Si el exceso de Na fuera debido a la modificación de la calidad de las aguas de riego o a que se aplican sin considerar la posibilidad del drenaje y lixiviación de las sales, por lo menos fuera de la zona de desarrollo radicular, se recomienda la incorporación de un filtro por ósmosis inversa a la salida de la bomba de riego. Entre las técnicas de desalación, esta es la que permite tratar un mayor volumen de agua con el coste más reducido.

Fuentes de información:

ASAE EP542 FEB1999 (R2013) Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer.
American Society of Agricultural and Biological Engineers

ASAE S313.3 FEB1999ED (R2013) Soil Cone Penetrometer.
American Society of Agricultural and Biological Engineers

Cropaia, 2023. PAQUETE TÉCNICO. Para el agricultor y el agrónomo.
https://drive.google.com/file/d/1xn-dkplgvFUpye2SNZIHDpmGM5_WwAzx/view

Colejo Blanco, S. 2017. Cultivo de arroz en el valle del río Senegal. Análisis de ciclo de vida y propuestas de mejora. Trabajo Fin de Máster Universitario en Gestión de la Seguridad y Calidad Alimentaria. Universitat Politècnica de València.

Eijkelkamp, 2018. Manual de instrucciones. Penetrómetro de mano Eijkelkamp. Royal Eijkelkamp.
<https://www.royaleijkelkamp.com/products/field-measuring-equipment/resistance-to-penetration/mechanical/hand-penetrometer-eijkelkamp-1-m-or-3-m/>

Euronews, 2016. Senegal: de la agricultura tradicional a la intensiva. Euronews 8/05/2016.

<https://es.euronews.com/next/2016/05/18/senegal-de-la-agricultura-tradicional-a-la-intensiva>

Fuentes Yagüe, J.L. 1987. El suelo y los fertilizantes. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Hurtado, P., Morbidelli, E. de Dios Herrero, J., Colazo, J.C., 2021. ¿Qué expresan los resultados de un análisis de suelo? Información técnica 198. EEA INTA San Luis.

IMKO, 2017. Manual-Handheld-Device-HD21. IMKO Micromodultechnik GmbH
<https://www.imko.de/en/soil-moisture/>

Kumar, A.; Chen, Y.; Sadek, A.; Rahman, A. 2012. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal 14(1):26-37

López Geta, J.A. y Mejías Moreno, M. 2023. Las aguas salobres. una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas. Instituto Geológico y Minero España.
<https://aguas.igme.es/igme/publica/pdfs/artycon21.pdf>

Oumar, E. and Romagosa, F. (2013). El impacto del turismo en la Lengua de Barbarie (delta del río Senegal). Cuadernos de Turismo, 31:289-309.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid: Mundi-Prensa.

Santos, B. *et al.* 2017. ¿Cómo tomar muestras de suelo? Información técnica. Tenerife: Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Local. Cabildo de Tenerife.

Schweizer Lassaga, S. 2011. Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. San José (Costa Rica): Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

Urbano Terrón, P., 1989. Tratado de Fitotecnia General. Madrid: Mundi-Prensa.