

Cátedra de Edafología

Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria
Universidad Nacional de Tucumán



Guía de estudio

Aireación del suelo

2023



AIREACIÓN DEL SUELO

Ing. Agr. Dorkas Andina Guevara
Ing. Agr. Juan Fernández de Ullivarri

1. INTRODUCCIÓN

Como ya sabemos, el suelo es un sistema trifásico, es decir, que está constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) que coexisten guardando una relación mutua entre ellas. En términos generales, la mitad del volumen total del suelo conforma la fracción sólida, el resto, el espacio entre las partículas sólidas del suelo (orgánicas e inorgánicas), constituye el volumen poroso (porosidad total) del suelo. Debido a que el aire y el agua comparten ese espacio poroso, las fracciones líquida y gaseosa van a depender del ordenamiento de las partículas en agregados (estructura), la textura del suelo y las propiedades derivadas que surjan de ellas como el movimiento del agua y la capacidad de retención hídrica. La proporción entre el aire y el agua del suelo también está sujeta a fluctuaciones ambientales, topográficas y de manejo.

Los poros del suelo que no están ocupados por agua constituyen la atmósfera del suelo. La aireación implica la ventilación del suelo, es decir, es el intercambio gaseoso entre la atmósfera del suelo y la atmósfera aérea. La aireación determina la velocidad de intercambio, la composición del aire del suelo y el potencial químico de oxidación o reducción.

La aireación es la ventilación del suelo que involucra el movimiento de gases tanto hacia adentro como hacia afuera del mismo. La aireación determina la velocidad de intercambio de gases con la atmósfera, la proporción del espacio poroso lleno con aire, la composición de este aire y el potencial químico de oxidación o reducción que resulta en el ambiente del suelo.

2. IMPORTANCIA

La mayoría de las reacciones biológicas que se realizan en un suelo consumen oxígeno y producen,

como subproducto, dióxido de carbono (CO_2). Este proceso general, conocido como respiración aeróbica, hace que la aireación del suelo sea un factor importante cuando se considera el crecimiento de las plantas.

El suelo tiene un gran efecto en la regulación de los GEI (gases de efecto invernadero) gracias a su función ecosistémica de regulación de intercambio gaseoso. Esta regulación se logra gracias a que el suelo constituye una gran reserva de carbono en forma orgánica en el suelo, fenómeno conocido como secuestro de carbono, ya que de esta manera evita la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera aérea. Además, un ambiente edáfico bien aireado permite el correcto ciclado de nutrientes, asegura la actividad microbiana y como consecuencia la descomposición de residuos. En cuanto a la nutrición de las plantas cultivadas o la vegetación natural tendrán aseguradas la asimilación de los elementos nutricionales que se encuentren en la solución del suelo y lograrán una adecuada exploración radicular.

Tanto para las plantas como para la actividad microbiana, el estado de aireación del suelo puede ser tan importante como el estado de humedad y, algunas veces, puede ser aún más difícil de manejar. Es imprescindible mantener un alto nivel de oxígeno en el suelo, para que la respiración de las raíces sea adecuada. Por otra parte, cuando se agota la provisión de oxígeno, se producen importantes cambios químicos y biológicos en el suelo.

3. CAPACIDAD DE AIRE EN EL SUELO

Se define la capacidad de aire como la «cantidad de aire que queda en el suelo luego que el mismo se ha llevado a un contenido de agua correspondiente al de capacidad de campo» (agua retenida en el suelo luego que el mismo se ha saturado y dejado de drenar por 24 horas). En otras palabras, la capacidad para el aire es

equivalente al volumen de los poros no capilares (macroporos).

Un suelo bien aireado es aquel en el cual los gases están disponibles para los organismos aeróbicos en cantidad suficiente y en proporción adecuada para asegurar los procesos metabólicos en forma óptima. La cantidad de poros llenos con aire es inversamente proporcional al contenido de humedad del suelo, por lo tanto crece con el aumento de la succión matriz del suelo y en detrimento del contenido hídrico. Un valor límite para que las plantas mesófitas manifiesten problemas en el desarrollo es en términos generales de 10 a 20% (Tabla 1).

Propiedades como el balance y utilización del agua; la difusión del aire y el calor y el desarrollo de las raíces dependen de la geometría del espacio poroso. Entiéndase por esto último el tamaño y distribución de poros y la tortuosidad de los mismos. En cuanto al tamaño de poros podemos considerar que existen dos categorías: macroporos y microporos. De los primeros depende el movimiento del agua gravitante, la aireación y el enraizamiento; en cambio de los microporos depende el almacenaje y la disponibilidad de agua para los vegetales.

Una capacidad mínima de aire (CMA) indica condiciones pobres de aireación del suelo, estas condiciones dependen, además del contenido hídrico, de la textura y estructura. En cambio, la tolerancia a distintos rangos de CMA depende del cultivo (Tabla 1).

Tabla 1: Umbrales de CMA para algunos cultivos seleccionados, por debajo del cual pueden ser afectados los rendimientos.

Cultivo	Umbral de CMA (%)
Trigo y avena	10 - 15
Cebada y remolacha	15 - 20

4. COMPOSICIÓN DEL AIRE DEL SUELO

La composición gaseosa del aire del suelo es similar a la atmosférica en aspectos cualitativos, no así cuantitativamente (Tabla 2).

Tabla 2: Composición química porcentual de los gases de la atmósfera aérea y el suelo superficial bien aireado.

Gas	Atmósfera aérea	Atmósfera edáfica
N ₂	78	78,5 - 80
O ₂	21	10 - 20
CO ₂	0,03	0,1 - 3,5
Vapor de agua	variable	En saturación

El contenido en oxígeno del aire del suelo oscila entre el 10 % y el 20 % y nunca alcanza el 21 % del aire atmosférico. El nitrógeno atmosférico y el edáfico no difieren mucho entre ellos, es casi constante su concentración. La discrepancia mayor se encuentra en la cantidad de dióxido de carbono, ya que el aire del suelo contiene, como mínimo, diez veces más que el atmosférico, y esto puede superarse ampliamente en suelos mal aireados. También existe una relación inversa entre los contenidos de O₂ y CO₂, ya que el aumento de uno implica la disminución del otro. A pesar de que las diferencias entre los contenidos del suelo y la atmósfera no son muy grandes, son significativas en su valor comparativo. Así, aún cuando el aire del suelo contiene solo 0,25 % de CO₂, este gas está ocho veces más concentrado que en la atmósfera (0,03 %). La razón principal de esta diferencia se debe a la respiración de las raíces de las plantas y de los microorganismos del suelo; sin olvidar el dióxido de carbono desprendido en la transformación de la materia orgánica.

Bajo condiciones aeróbicas el volumen de CO₂ producido en el suelo es aproximadamente igual al volumen de O₂ consumido, por lo que la suma del porcentajes de CO₂ y O₂ es aproximadamente el mismo en el aire del suelo que en la atmósfera. Sin embargo, si el suelo está inundado (como en un cultivo de arroz) no contiene aire en el sentido usual de la palabra. En su lugar los gases de la atmósfera se disuelven en el agua de las capas superficiales y son arrastrados en profundidad. El O₂ disuelto se consume en los primeros centímetros del suelo y se producen gases tales como CO, NO₂, metano, CO₂ y H₂ que salen a la superficie en forma de burbujas (la cantidad de estos gases producidos es mayor que el O₂ que entra al suelo). Esas burbujas si bien contienen todos los gases menciona-

dos, están compuestas fundamentalmente por N_2 que deriva del N_2 atmosférico disuelto en el agua.

El consumo de O_2 y la producción de CO_2 generalmente son mayores en la parte superior del suelo y es allí también donde la velocidad del intercambio gaseoso es mayor. El resultado neto es que la semejanza entre la composición del aire del suelo y del atmosférico es mayor en las capas superficiales y cada vez se diferencia más a medida que aumenta la profundidad.

La composición de gases en el aire del suelo varía dependiendo de los procesos que ocurren conjuntamente en el mismo. Durante la descomposición de residuos orgánicos, especialmente bajo condiciones anaeróbicas se producen gases como óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y sulfuro de hidrógeno (SH_2). Otros gases generados por el metabolismo microbiano anaeróbico son etileno (C_2H_4), el cual, es tóxico para las raíces, y CH_4 .

5. FACTORES QUE DETERMINAN LA DISPONIBILIDAD DE AIRE EN EL SUELO

La disponibilidad de oxígeno en los suelos está regulada por los siguientes factores:

- La porosidad del suelo (textura, estructura)
- El consumo de O_2 en el proceso respiratorio de los organismos del suelo (raíces, mesofauna y microorganismos)
- El contenido de agua del suelo (que afecta la porosidad llena con aire)
- Temperatura

5.1. LA POROSIDAD DEL SUELO

El drenaje del agua gravitante del perfil y la difusión de aire dentro del suelo se producen rápidamente por los macroporos. Los agregados grandes y estables estimulan la formación de poros grandes que drenan rápidamente el agua después de una lluvia, permitiendo que los gases se trasladen desde el suelo hacia la atmósfera. Un suelo franco arenoso podrá tener mayor proporción de oxígeno que un suelo arcillo limoso,

por lo antes explicado.

La macroporosidad del suelo superficial es una propiedad muy dinámica, ya que varía mucho con la intensidad y tipo de labores, con los sistemas de cultivo y con las condiciones climáticas. Las labores culturales generalmente aumentan la porosidad total y la capacidad para el aire en los suelos muy compactos. Por otro lado, una pulverización extrema y compactación por rodillo pueden provocar una disminución en la macroporosidad. El impacto de las gotas de lluvia tiende a dispersar las partículas y producir una compactación superficial (encostramiento), lo cual causa una disminución en la porosidad, especialmente en los poros no capilares.

La compactación del suelo, producto de la labranza o el tránsito de la maquinaria, también puede interrumpir el intercambio aun cuando el suelo no se encuentre saturado. En este caso puede aumentar el contenido de dióxido de carbono porque se ve interrumpida la interconexión entre poros en detrimento del intercambio gaseoso. Asimismo, la compactación del suelo, mediante su efecto en la disponibilidad de O_2 , puede reducir la absorción de nutrientes. La conservación de la materia orgánica en terrenos cultivados es el medio para mantener la estabilidad estructural, propiedad que favorece el drenaje y aireación de los suelos.

En suelos pobremente drenados de textura pesada (arcillosos) es difícil mantener una aireación óptima debido a la distribución del tamaño de poros y a la condición de saturación.

5.2. EL CONSUMO DE OXÍGENO EN EL PROCESO RESPIRATORIO DE LOS ORGANISMOS DEL SUELO

En el proceso de respiración de los organismos del suelo, se produce dióxido de carbono y se consume el oxígeno del suelo. Las raíces en contacto con el suelo tienen un intercambio gaseoso donde el oxígeno difunde a las células radiculares y el dióxido de carbono difunde en el suelo. Entre las plantas existen grandes diferencias en su capacidad para tolerar concentraciones bajas de oxígeno, el arroz por ejemplo puede cre-

cer en condiciones de saturación debido a que tienen estructuras morfológicas que permiten la difusión del O_2 atmosférico a sus raíces. Dos aspectos importantes de la deficiencia de oxígeno son la duración del período y la etapa del desarrollo de la planta mesófito.

La deficiencia de O_2 también limita la capacidad para absorber nutrientes, el contenido de humedad del suelo es importante debido a que influye en la tasa de movimiento y difusión de los iones.

Las concentraciones de O_2 y CO_2 dependen, en gran medida, de la actividad microbiana y la fuente carbonada que la sustentan. La incorporación de grandes cantidades de abono, residuos de cosecha o barros cloacales puede alterar apreciablemente el aire del suelo. Las raíces de las plantas en crecimiento pueden aumentar o disminuir la concentración de O_2 . En suelos pobremente drenados, plantas no hidrófilas pueden agotar el O_2 en el suelo que las rodea. Por el contrario, plantas hidrófilas con tejido de aerenquima puede transportar hacia sus raíces un exceso de O_2 , lo que produce una zona oxidada en un suelo que es anaeróbico.

5.3. EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO

La aireación pobre del suelo es una condición en que la disponibilidad de O_2 en la zona radicular es insuficiente para soportar el crecimiento óptimo de la mayoría de las plantas, esto ocurre generalmente cuando el 80-90 % del espacio poroso está lleno de agua. El contenido alto de agua no sólo deja poco es-

pacio poroso para el almacenamiento de aire sino que el agua bloquea las vías por la que los gases podrían intercambiar con la atmósfera.

También hay que considerar a la población microbiana en relación con las condiciones hídricas del suelo, la cual tiene un rango de adaptación mayor que las plantas superiores. Pueden llevar a cabo la respiración en suelos demasiados secos para el crecimiento de las plantas, así como en suelos saturados de agua. En suelos relativamente secos hay un amplio espacio poroso ocupado por aire, que permite un rápido intercambio gaseoso, y por lo tanto, la respiración de los microorganismos no es competitiva con las plantas. En suelos mojados, el intercambio gaseoso es lento, y la respiración de los microorganismos puede ser suficiente para agotar el suministro de O_2 en el suelo en un período tan corto como un día. Algunas plantas y microorganismos están adaptados a condiciones anaeróbicas.

En las tierras anegadas (Figura 1) el grado de saturación está dado por el nivel de la capa freática (en o debajo de la superficie del suelo), nivel que puede fluctuar dependiendo de varios factores. Estos suelos tienen generalmente un régimen de humedad ácuico o perácuico y pertenecen al orden de los Histosoles en la Taxonomía Americana de Suelos, mientras que otros se clasifican a nivel de subórdenes dentro de los órdenes Entisoles (Aqueuts), Inceptisoles (Acuepts), Alfisoles (Acualf) y Molisoles (Acuol). También puede usarse el régimen hídrico del suelo a nivel más bajo en la clasificación americana como es el caso de los sub-



Figura 1: Suelo saturado en relieve concavo sembrado con soja en la Ramada de Abajo (Tucumán).

grupos ácuicos dentro de algunos Grandes Grupos.

En términos generales, para la determinación de la condición del drenaje del suelo puede usarse el color. Los colores rojo, amarillo y castaño rojizo son característicos de las condiciones de buena oxigenación. Si no hay suficiente oxígeno, predominan matices más apagados, como grises y azules (Figura 2) con un chroma 1 o menor, como se mencionó anteriormente. Los suelos imperfectamente drenados se caracterizan por vetas contrastantes de materiales oxidados y reducidos (Figura 3)



Figura 2: Suelos de colores gris-verdoso, chroma menor a 1 (hierro y manganeso reducidos) cerca de Dossenbach, Alemania. Fuente: [U. Burkhardt \(CC BY-SA 3.0\)](#)

5.4. TEMPERATURA

La temperatura influye en la respiración ya que con el aumento de temperatura aumenta la actividad microbiana y con ella el consumo de O_2 , por lo tanto también aumentará el contenido de CO_2 en el ambiente edáfico.

6. MECANISMOS DE INTERCAMBIO GASEOSO

El intercambio gaseoso se realiza por dos mecanismos: flujo de masa y difusión. El flujo de masas involucra la renovación del aire del suelo donde sale un volumen de aire viciado e ingresa aire puro. Pero la mayor parte del intercambio gaseoso se produce por difusión.

6.1. FLUJO DE MASA

6.1.1. FACTORES QUE AFECTAN EL FLUJO DE MASA

El flujo de masas de aire es un proceso mucho menos importante que la difusión, no obstante es influenciado por las fluctuaciones del contenido hídrico, el viento, los cambios de la presión barométrica y la temperatura del suelo. Dichos eventos fuerzan el aire hacia dentro o fuera del suelo intensificando este flujo de masa.

6.1.1.1. Contenido hídrico

La infiltración del agua en el suelo causa la renovación del aire por dos razones: una por el desplazamiento del aire de los poros y otra por el oxígeno disuelto en el agua. En muchos casos el aire queda atrapado en los poros con su posterior consecuencia destructiva (efecto del aire entrampado). De igual manera cuando el suelo se seca ingresa aire.

6.1.1.2. Acción del viento

La turbulencia del aire mezcla el aire en la capa



Figura 3: Suelo imperfectamente drenado con presencia de signos de hidromorfía (moteados de hierro y manganeso oxidados en la zona de fluctuación de la capa freática en North Carolina (EEUU). Fuente: [Soil Science "Coxville series - Soilscape"](#) (CC BY 2.0)

superficial y acrecienta el transporte. Esto va a depender a su vez de la cobertura del suelo.

6.1.1.3. Presión barométrica

Todo cambio de la presión barométrica se refleja en los poros del suelo, la disminución de la misma provoca la dilatación del aire del suelo con su consecuente flujo de aire del suelo a la atmósfera.

6.1.1.4. Temperatura

La renovación del aire por efecto de la temperatura puede realizarse de dos maneras:

- **Diferencia de temperatura en el perfil del suelo:** la dilatación y contracción del aire del suelo y la tendencia del aire caliente a elevarse causa el intercambio entre los horizontes del suelo.
- **Diferencia de temperatura en la atmósfera y el suelo:** esta diferencia de temperatura provoca el intercambio de gases entre la capa superficial del suelo y la atmósfera por movimiento convectivo.

6.2. PROCESO DE DIFUSIÓN

En el proceso de difusión cada gas se mueve en una dirección a consecuencia de su presión parcial

particular. En una mezcla, la presión parcial de un gas es simplemente la presión que ese gas ejercería si estuviese solo en el volumen ocupado por la mezcla. Así, si la presión del aire es 1 atmósfera (100 kPa), la presión parcial de oxígeno, que constituye alrededor del 21 % del volumen del aire (0,21 L/L), es aproximadamente 21 kPa.

Aún cuando no haya un gradiente de presión para la mezcla total de gases en conjunto, la difusión permite grandes movimientos de gases de un área a otra. Esto es debido a que hay un gradiente de concentración para cada gas individual, que puede ser expresado como gradiente de presión parcial. Como consecuencia, la mayor concentración de oxígeno en la atmósfera dará como resultado un movimiento neto de este gas hacia adentro del suelo.

Normalmente el dióxido de carbono y el vapor de agua se mueven en dirección contraria, debido a que la presión parcial de estos gases es generalmente más alta en el aire del suelo que en la atmósfera.

La superficie del suelo actúa como una membrana permeable que permite el paso de los gases. Se intercambian selectivamente los gases del suelo con los de la atmósfera para tratar de equilibrar su composición. Así, cuando en el suelo aumenta el CO_2 , se produce una difusión del CO_2 a la atmósfera aérea y si en el suelo disminuye el O_2 se produce una difusión

del O_2 de la atmósfera al suelo (Figura 4). Es el factor principal en los intercambios de gases entre el suelo y el aire exterior y, por tanto, el causante principal de la renovación de la atmósfera del suelo.

En el límite, entre la superficie del suelo y el aire atmosférico (Figura 4), la presión total de gases es la misma. Sin embargo, la presión parcial de oxígeno es mayor en la atmósfera aérea. En consecuencia, el oxígeno tiende a difundir hacia dentro del poro del suelo donde hay menos moléculas de oxígeno por unidad de volumen. Por otra parte, las moléculas de dióxido de carbono se trasladan en sentido opuesto, debido a la mayor presión parcial de este gas en el poro. Esta difusión de O_2 hacia el poro y de CO_2 hacia la atmósfera, continuará mientras la respiración de las células de las raíces y de los microorganismos consume O_2 y libere CO_2 .

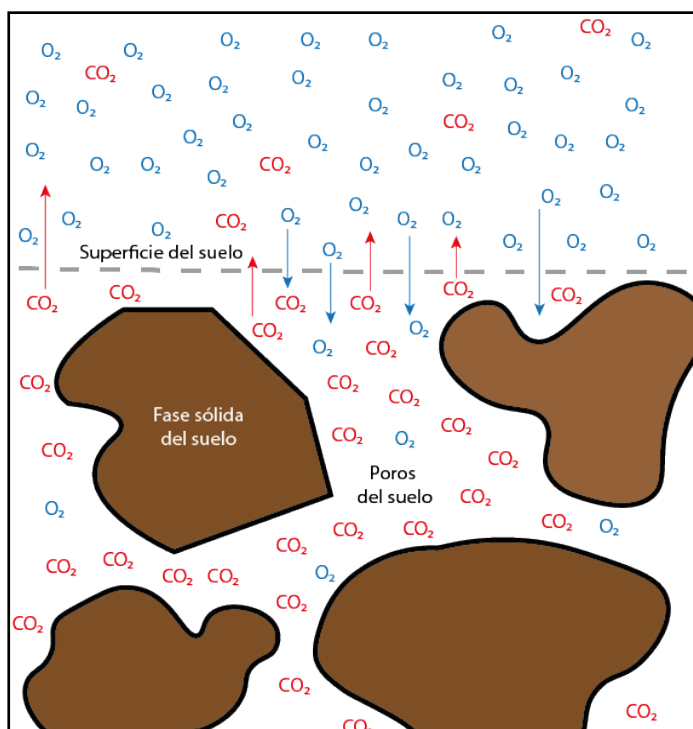


Figura 4: Representación gráfica del proceso de difusión de gases entre un poro del suelo y la atmósfera: En el límite, entre la superficie del suelo y el aire atmosférico, la presión total de gases es la misma. Sin embargo, la presión parcial de oxígeno es mayor en la atmósfera aérea. En consecuencia, el oxígeno tiende a difundir hacia dentro del poro del suelo donde hay menos moléculas de oxígeno por unidad de volumen. Por otra parte, las moléculas de dióxido de carbono se trasladan en sentido opuesto, debido a la mayor presión parcial de este gas en el poro.

El proceso de difusión gaseosa responde a la ley de Fick, la misma expresa que la difusión es función de tres variables: el gradiente de concentración $\Delta c/L$ ($\text{mol}/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}$), el coeficiente de difusión del medio D_o (cm^2/seg) y el área de la sección transversal A (cm^2):

$$\frac{dQ}{dt} = D_o \cdot A \left[\frac{\Delta c}{L} \right]$$

Donde:

dQ/dt: Cantidad de gas (mol) que se difunde en el tiempo dt (seg) a través del área A

D_o: coeficiente de difusión en el aire

Δc: diferencia de concentración entre dos puntos (mol/cm^3)

L: distancia en cm que separa los dos puntos

La ecuación anterior se aplicaría si toda la superficie del suelo participara en la difusión. Como el suelo es un sistema poroso el área transversal requiere un ajuste por el volumen efectivo de poros ya que la velocidad de difusión aumenta con el cuadrado del espacio poroso; y un ajuste por la tortuosidad de los poros ya que aumenta la trayectoria de los gases en los suelos. Entonces si se toman en cuenta la sección transversal disponible para la difusión y la trayectoria efectiva para las moléculas la ecuación cambia:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{D_o}{\beta} \cdot A \cdot S \left[\frac{\Delta p}{L_e} \right]$$

Donde:

D_o: Coeficiente de difusión del aire

A: Área de la sección transversal

β: Constante de proporcionalidad

Δp: diferencia de presiones parciales entre dos puntos

L_e: longitud efectiva de la trayectoria entre dos puntos

El espacio de poros en la sección transversal (S) representa la porosidad efectiva es decir los poros ocupados por aire (Figura 5). En otras palabras, este ajuste depende de la textura, estructura y presencia de la freática. En suelos que se encuentren en capacidad de campo, la porosidad efectiva, está dada por capacidad de aire y a medida que el suelo se seca mayor será la porosidad efectiva S.

6.2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA DIFUSIÓN

6.2.1.1. Tipo y forma de las partículas

El tipo de partícula determina la naturaleza de

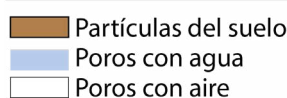
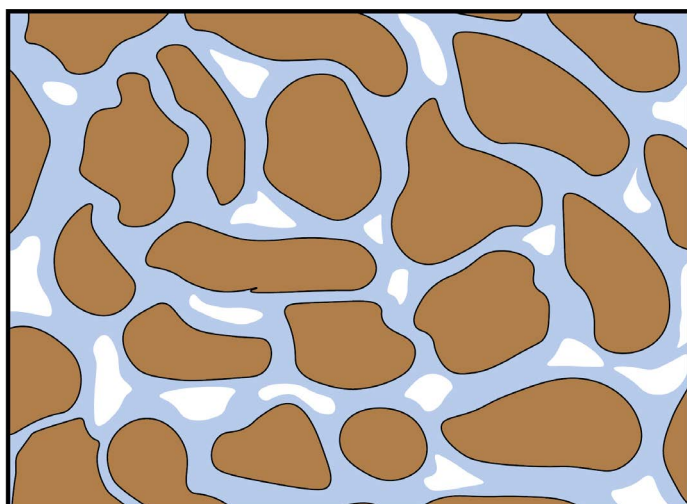


Figura 5: Porosidad efectiva de aire

la porosidad y conjuntamente con la forma determinan la geometría del espacio poroso ya que en general las partículas del suelo no son esféricas. De igual manera afectan la textura y estructura por su relación directa en la porosidad efectiva (poros con aire y tortuosidad)

6.2.1.2. Efecto de la humedad del suelo

El proceso de difusión está relacionado con el volumen del espacio poroso lleno de gas. Una baja capacidad de aireación del suelo es causada por la presencia de agua en el espacio poroso (saturación). A medida que aumenta el contenido de agua del suelo aumenta la longitud de la ruta de difusión de oxígeno a la superficie radicular disminuyendo la disponibilidad de oxígeno. En resumen la difusión disminuye con el contenido de humedad.

6.2.1.3. Relación entre las raíces y el suelo

en el suelo existe una demanda de oxígeno por parte de las raíces y una capacidad de oferta por parte del suelo, esto afecta al coeficiente de difusión efectiva debido a que el O_2 que llega a las raíces es regulado por la tasa de intercambio de gases entre el aire del suelo y la atmósfera y por el paso de O_2 de los poros del suelo

a la superficie de las raíces atravesando una película de agua que las rodea al igual que a las partículas del suelo (Figura 6). Aunque esta película de agua es una pequeña fracción de la longitud del recorrido la longitud efectiva aumenta debido a que el oxígeno difunde 10.000 veces más rápido a través de un poro lleno de aire que en un poro similar lleno de agua.

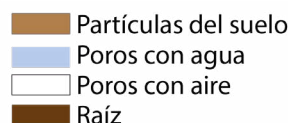
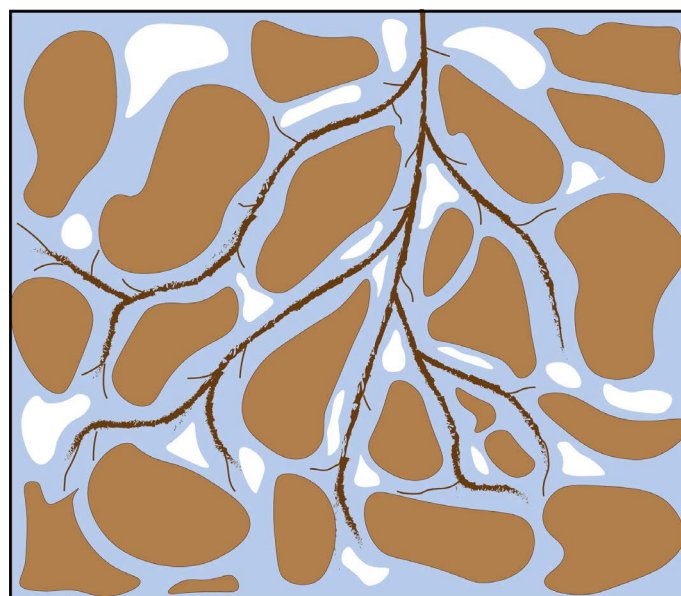


Figura 6: Película de agua alrededor de las partículas de suelo y las raíces que afectan la difusión del aire.

7. RELACIÓN ENTRE LA AIREACIÓN Y EL CRECIMIENTO VEGETAL

Las condiciones de mala aireación afectan a las plantas adversamente al menos de tres maneras:

1. Restricción del crecimiento de las plantas
2. Absorción de nutrientes y agua
3. Formación de compuestos tóxicos

7.1. RESTRICCIÓN DEL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Las diferentes especies de plantas varían en su tolerancia a la pobre aireación. Especies forestales como sauces y álamos se comportan muy bien en suelos con poca porosidad de aire. El arroz se cultiva mayormente

en el mundo en condiciones de anegamiento artificial y puede lograrlo gracias sus tejidos aerenquimáticos (células que contienen cámaras de aire). Un ejemplo natural de plantas adaptadas a condiciones de permanente saturación son los manglares (Figura 7), en realidad constituyen un conjunto de especies arbustivas o arbóreas que crecen en aguas costeras tropicales gracias a sus largos tallos que se introducen en el suelo y generan raíces que les permite tolerar la saturación con agua y la salinidad marina.

El conocimiento de la tolerancia de las plantas a la pobre aireación es útil cuando se escoge las especies apropiadas para repoblar sitios anegados. La presencia de plantas especialmente adaptadas a condiciones anaeróbicas es útil para identificar las tierras anegadas.

Sin embargo, para la mayoría de las plantas cultivadas, es necesaria una condición aeróbica del suelo para lograr una adecuada respiración radicular.



Figura 7: Manglares tolerantes a salinidad y bajas tensiones de oxígeno en las raíces.

7.2. ABSORCIÓN DE NUTRIENTES Y AGUA

Los bajos niveles de O_2 restringen la respiración radicular, proceso que provee la energía necesaria para la absorción de nutrientes y agua. Como resultado, algunas veces la causa aparente de que las plantas se marchiten y reduzcan la absorción de agua es el exceso de agua que encharca los puntos bajos (Figura 8).

Asimismo, en suelos pobremente drenados, las plantas pueden mostrar signos de deficiencias de nu-

trientes, aún cuando estos sean abundantes. Los procesos metabólicos de las raíces que requieren suelos bien drenados son detenidos casi inmediatamente cuando la ventilación del suelo es inadecuada. Si el proceso de difusión gaseoso se ve interrumpido por un día, puede disminuir los rendimientos de las plantas y puede llegar a matar las raíces si continúa por varios días. Además, estas condiciones, limitan los procesos biológicos relacionados con la mineralización de la materia orgánica, y en este sentido afecta aspectos relacionados con la fertilidad de los suelos. Los primeros síntomas pueden aparecer a las 72 horas del anegamiento, observándose la presencia de clorosis (amarillamiento) de las hojas superiores de la planta. Esto sucede como producto de la disminución de la fotosíntesis de la planta y la baja regulación de las enzimas fotosintéticas, que afecta negativamente a las plantas provocando la reducción de su crecimiento y desarrollo y la disminución de la absorción de nutrientes (especialmente nitrógeno, hierro y azufre) y agua.



Figura 8: Caña de azúcar afectada por el encharcamiento en zonas bajas

7.3. FORMACIÓN DE COMPUESTOS TÓXICOS

Cuando el suelo está saturado con agua, se comienzan a acumular gases tóxicos, tales como dióxido de carbono, etileno o metano, producidos por las raíces y microorganismos. Además se produce un cambio en el estado de oxidación de los nutrientes

minerales, que puede resultar en una menor disponibilidad de los mismos o en un aumento de la toxicidad por la formación de compuestos tóxicos. También el ambiente húmedo y sostenido en el tiempo provoca el desarrollo de numerosas enfermedades que pueden atacar tanto a las raíces como a la parte aérea de la planta.

8. LA AIREACIÓN DEL SUELO Y SU EFECTO EN LA NUTRICIÓN

La disponibilidad de nutrientes para los cultivos está inmediatamente relacionada con el grado de aireación del suelo. Los suelos con buenas condiciones de aireación ofrecen un medio de crecimiento favorable para las plantas, mientras que en condiciones pobres de aireación se produce un desequilibrio de nutrientes que impide el crecimiento y desarrollo de las plantas.

El impacto de la aireación del suelo en el suministro de nutrientes afecta a macronutrientes, como el nitrógeno y el azufre, y también a micronutrientes, como el hierro y el manganeso.

Nitrógeno: La fijación del nitrógeno atmosférico se lleva a cabo con bacterias aeróbicas fijadoras simbióticas o libres. Entre las libres podemos mencionar a *Azospirillum* y entre las simbióticas al género *Rhizobium*, esta última simbiote de las leguminosas. En la mineralización del nitrógeno orgánico, en el proceso de nitrificación por medio del género *Nitrobacter*, el nitrógeno (amida) se oxida a nitrato, en condiciones de una aireación suficiente. Si el suelo se encuentra en condiciones de anaerobiosis no se producirá la nitrificación sino que solamente podrá producirse la amonificación, donde la resultante de esta etapa es el amonio, compuestos que entre las plantas cultivadas puede aprovecharlo el cultivo de arroz. En el caso que en el medio edáfico se produzca una ocurrencia de lluvia habiendo nitratos en el medio, los mismos sufrirán el proceso de desnitrificación y cambiarán de NO_3^- a NO_2^- (respiración anaeróbica).

Azufre: cuando el suelo está bien aireado, el azufre orgánico se oxidará a sulfato, forma en la que es tomada por las plantas desde la solución del suelo. Si las condiciones son de reducción (anegamiento) predominarán las formas reducidas como el sulfuro. Cuando el sulfuro se combina con hierro (pirita) el sistema regulará la concentración extrema de S^- . Tanto la oxidación como la reducción está llevada a cabo por organismos específicos la primera del género *Thiobacillus* y la segunda *Desulfovibrio*.

Hierro y Manganeso: tienen una valencia alta en los suelos con buena aireación y baja en aquellos con mala aireación. Aunque las plantas sólo pueden asimilar las formas de baja valencia que son las formas solubles. Al ser micronutriente la excesiva concentración en la solución del suelo es perjudicial para los cultivos. Por esta razón, hay que limitar el acceso excesivo a las formas de baja valencia y los riesgos de toxicidad se mitigan con la aireación del suelo. Como los compuestos de Fe y Mn son muy sensibles a cambios de pH y Eh (potencial redox)¹, sus formas reducidas las encontraremos tanto en condiciones de saturación como de pH bajos (Figura 9). Es decir que en suelos bien aireados y pH altos encontramos las formas oxidadas que conforman la fracción sólida.

El desequilibrio de nutrientes afectará a toda la planta y provocará pérdidas de rendimiento. Los signos de una mala aireación incluyen raíces gruesas, cortas y oscuras de formas anormales, pelos absorbentes poco desarrollados.

Otra desventaja importante de una aireación insuficiente del suelo es la mayor susceptibilidad del cultivo a patógenos y hongos que pudren las raíces. En consecuencia, es necesario un mejoramiento de la aireación del suelo.

1. El potencial redox es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones (Página 12)

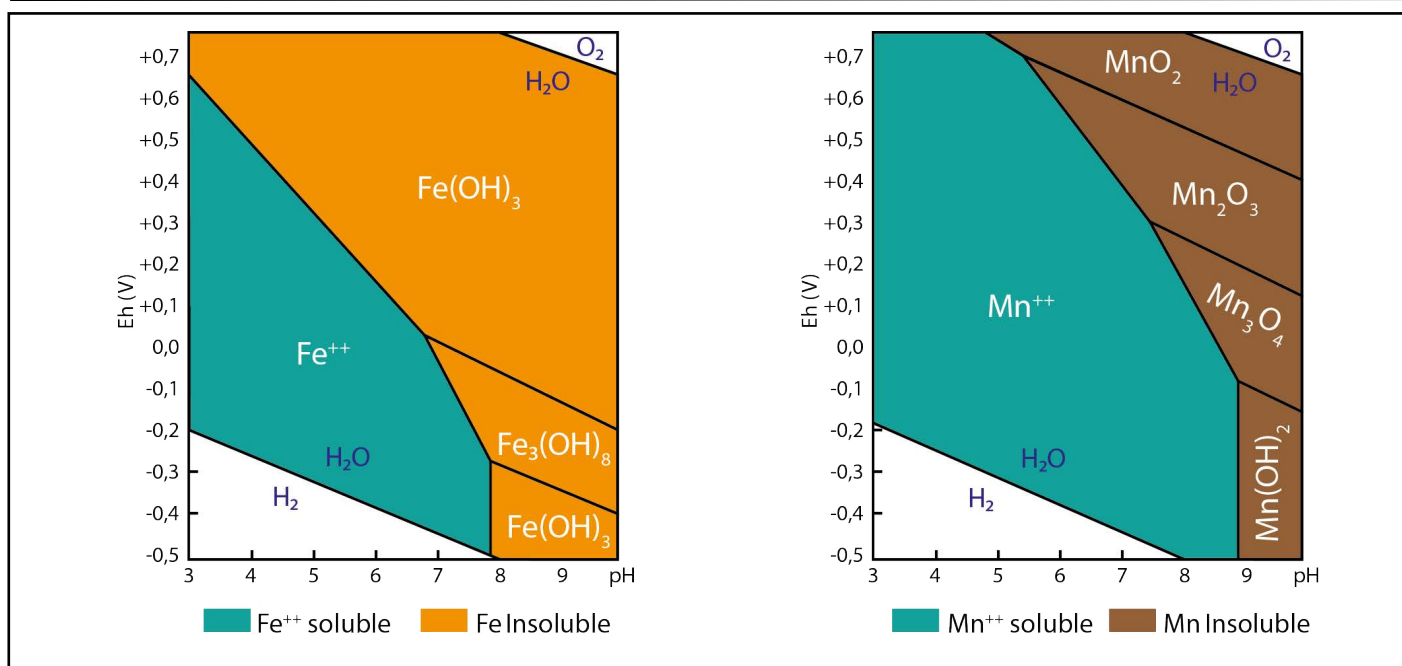


Figura 9: Efecto del pH en los potenciales redox de hierro y manganeso que se producen en los suelos

9. MEDICIÓN DE LA AIREACIÓN DEL SUELO

El estado de aireación de un suelo puede caracterizarse de varias maneras, incluyendo (1) la porosidad del suelo llena con aire (porosidad efectiva S) y (2) el potencial químico de oxidación – reducción.

9.1. POROSIDAD LLENA DE AIRE

Sabiendo que el suelo constituye un sistema de tres fases, la proporción ideal del para el crecimiento de las plantas debería contener 50 % de fase sólida y 50 % de porosidad total, esta última distribuida en 25 % de aire (fase gaseosa) y 25 % de agua o fase líquida. Muchos investigadores consideran que, en la mayoría de los suelos, la actividad microbiológica y el crecimiento de las plantas quedan inhibidos gravemente cuando la porosidad llena por aire desciende a menos de 20 % del espacio poroso, dicho de otra manera más del 30 % de la fase líquida, o 10 % del volumen total del suelo.

Una de las principales razones por las que los altos contenidos de agua causan deficiencias de oxígeno para las raíces, es que los poros llenos de agua bloquean la difusión del oxígeno hacia adentro del suelo,

dificultando la respiración. En realidad, el oxígeno se difunde 10.000 veces más rápido a través de un poro lleno de aire que en un poro similar lleno de agua.

La porosidad llena de aire en un momento dado (% fase gaseosa-FG) se la puede medir a partir del conocimiento del contenido hídrico del suelo (% fase líquida-FL) y la porosidad total (Pt).

$$FG = Pt - FL$$

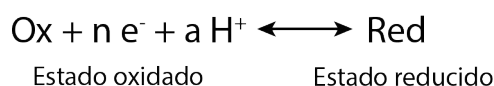
9.2. POTENCIAL DE OXIDACIÓN - REDUCCIÓN

Una característica química importante de los suelos que se relaciona con la aireación es los estados de oxidación y reducción de los elementos químicos. Si un suelo está bien aireado, dominan los estados oxidados, tales como el Fe (III) en el FeOOH (oxihidróxido férrico como la goethita) y el N (V) en el NO³⁻ (nitrato). En los suelos poco aireados, se encuentran las formas reducidas de estos elementos; por ejemplo Fe (II) en el FeO (óxido ferroso) y N (III) en el NH⁴⁺ (amonio). La presencia de estas formas reducidas indica que el drenaje está restringido y la aireación es pobre.

El potencial redox (Eh) da una medida de la ten-

dencia de una sustancia a aceptar o donar electrones. Se mide usualmente en voltios o milivoltios. La reacción que se produce cuando un elemento cambia del estado oxidado al reducido puede ser ilustrada de la siguiente manera:

El potencial de oxidación de un sistema se lo expresa por la ecuación de NERNST:



La oxidación es la pérdida de electrones que sufre una sustancia, la reducción es la ganancia de los mismos.

Si una sustancia acepta electrones fácilmente, se dice que es un agente oxidante (y se reduce); si una sustancia entrega electrones fácilmente, se dice que es un agente reductor (y se oxida).

El potencial redox está relacionado a un estado de referencia, en este caso el par hidrógeno, $1/2\text{H}_2 = \text{H}^+ + e^-$, cuyo potencial redox se toma arbitrariamente como cero.

$$E_h = E^\circ + \frac{R \cdot T}{nF} \cdot \log \frac{[\text{Ox}] [\text{H}^+]^a}{[\text{Red}]}$$

Donde:

E_h: Potencial redox

E^o: Constante denominada "patrón"

R: Constante de los gases (8,314510 V.C/K mol)

T: Temperatura absoluta en °K

F: Constante de Faraday (96.500 coulomb/mol)

n: número de electrones que se transfiere

Este potencial redox puede ser medido usando un electrodo de platino y el de referencia, se insertan en el suelo o suspensión y se miden su potencial con un potenciómetro sensible. El potencial redox constituye una medición de intensidad, es decir, mide la disponibilidad y no la cantidad de electrones.

10. PROCESOS DE ÓXIDO REDUCCIÓN DEL SUELO

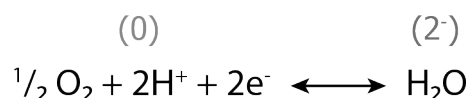
Las reacciones de oxido reducción ocurren en

general en todos los suelos. Este proceso es de gran importancia en la meteorización, acumulación de materia orgánica, formación de suelos y la disponibilidad de ciertos nutrientes como el Fe y el Mn. Muchas de las reacciones inorgánicas y casi todas las reacciones biológicas del C, N y S son reacciones de oxido-reducción. Estas reacciones químicas del suelo dependen de la presencia o ausencia de O₂, es decir, de condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

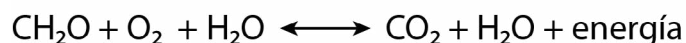
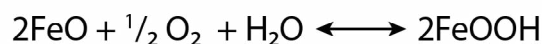
10.1. ACEPTORES DE ELECTRONES

El gas oxígeno (O₂) es un ejemplo notable de agente oxidante fuerte, ya que acepta rápidamente electrones de muchos otros elementos. Toda la respiración aeróbica necesita O₂, que sirve como aceptor de electrones cuando los organismos vivos oxidan carbono orgánico (donador de electrones) liberando energía para vivir.

El oxígeno puede oxidar tanto sustancias orgánicas como inorgánicas:



En la semireacción precedente se puede observar que el átomo de oxígeno con carga cero, acepta dos electrones (2 e⁻) adquiriendo carga -2 cuando se transforma en parte de la molécula de agua. Esos electrones podrían haber sido donados por dos moléculas de FeO que se oxidan o la materia orgánica del suelo como se aprecia en las siguientes reacciones:



Estas reacciones se producen en condiciones aeróbicas, es decir con un potencial redox E_h entre 0,38 a 0,32 V. Cuando el oxígeno gaseoso del suelo se agota, existen otros elementos que pueden actuar como aceptores terminales de electrones (oxidantes). En estas condiciones el E_h del suelo cae del rango 0,38-0,32 V a valores menores (Tabla 3).

Los microorganismos tienen que utilizar aceptores de electrones más débiles. Usualmente, el elemento presente que sigue por su facilidad para ser reducido, es el N (V) como nitrato, (NO_3^-). Si el suelo contiene mucho nitrato, mientras este se reduce, el Eh se mantendrá cerca de 0,28 a 0,22 V. Cuando casi todo el nitrato se ha transformado a N (III) y otras especies de N, el Eh caerá aún más.

En este punto, se pondrán en actividad los organismos capaces de reducir Mn, y así sucesivamente. De este modo, a medida que los valores de Eh descienden, los elementos N, Mn, Fe, S (en SO_4^{2-}) y C (en CO_2) aceptan electrones y se transforman en elementos reducidos, casi siempre en el orden enumerado. En los suelos hidromórficos la saturación en agua tiende a provocar un ambiente reductor, de tal manera que el Fe^{2+} y Mn^{2+} se encuentren en concentraciones tóxicas en la solución del suelo. La producción de metano en el suelo se originará a valores menores a cero voltios de Eh.

Tabla 3: Formas Oxidadas y Reducidas de Ciertos Elementos en los Suelos y Potenciales Redox Eh a los que se Producen los Cambios de Forma en un Suelo de pH 6,5. Fuente: Patrick y Jugsujinda (1992).

Forma oxidada	Forma reducida	Eh (V) al que ocurre el cambio de forma
O_2	H_2O	0,38 a 0,32
NO_3^-	N_2	0,28 a 0,22
Mn^{4+}	Mn^{2+}	0,22 a 0,18
Fe^{3+}	Fe^{2+}	0,11 a 0,08
SO_4^{2-}	S^{2-}	-0,14 a -0,17
CO_2	CH_4	-0,20 a -0,28

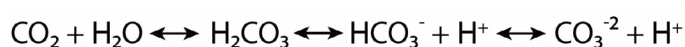
Así, la aireación del suelo contribuye a determinar qué especies químicas específicas están presentes en los suelos y, a la vez, la disponibilidad, movilidad y posible toxicidad de varios elementos. Note que el valor de Eh al que se producen las reacciones de oxidación-reducción varía según el compuesto específico a ser oxidado o reducido, los valores de Eh explican el orden en que suceden las reacciones cuando un suelo bien aireado queda saturado con agua.

Debido a la heterogeneidad del suelo las condi-

ciones redox varían ampliamente en distancias cortas, es decir, que en suelos aeróbicos sus agregados internos pueden ser anaeróbicos. En cambio los suelos en condiciones anaeróbicas son más homogéneos.

10.2. PROCESOS REDOX Y pH DE LOS SUELOS

En condiciones de aerobiosis se produce siempre CO_2 generando un aumento de la presión parcial de este gas (P_{CO_2}) esto disminuye el pH del suelo siendo este efecto más marcado en suelos calcáreos.



Por el contrario, en condiciones de anaerobiosis las reacciones redox que ocurren, en algunos casos a partir de compuestos orgánicos, los protones y electrones no se encuentran balanceados, véase que en la cupla del $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ debe tomar protones del medio para reducirse lo que produce un aumento del pH del medio (Figura 10). Lo mismo ocurre con las cuplas $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$ y $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{S}$.

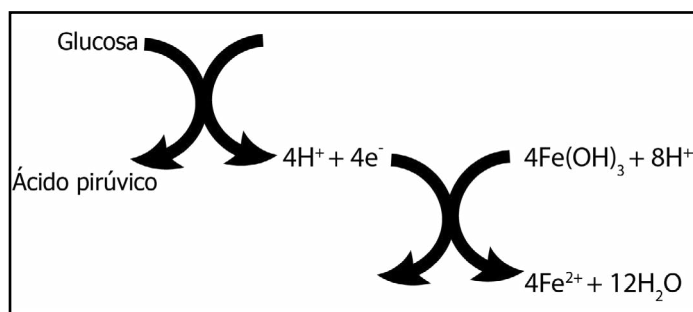


Figura 10: Reacción redox en condiciones anaeróbicas y su efecto en el aumento de pH al consumir los protones del medio

Los valores de pH y potencial redox (Eh) delimitan los campos de estabilidad de los materiales del suelo. El potencial redox se encuentra estrechamente vinculado con la aireación del sistema edáfico, así como con el pH, ya que ambos condicionan tanto la actividad microbiana como el tipo de reacciones que ocurrirán en él. En la Figura 11 se muestra el efecto del pH en los potenciales redox de varias reacciones importantes que se producen en los suelos. El efecto es inversamente proporcional, es decir, que a medida que

aumenta el pH el potencial redox disminuye. Los rangos de Eh expuestos en la tabla 3 justamente dependen del pH donde el mayor potencial requerido para reducirse de un compuesto es a menor pH. A un mismo pH, por ejemplo 6, el requerimiento de Eh para que se reduzca el FeOOH a ion Fe^{2+} es de casi +0,28, en cambio para que se produzca gas metano en condiciones anaeróbicas el Eh es de -0.2.

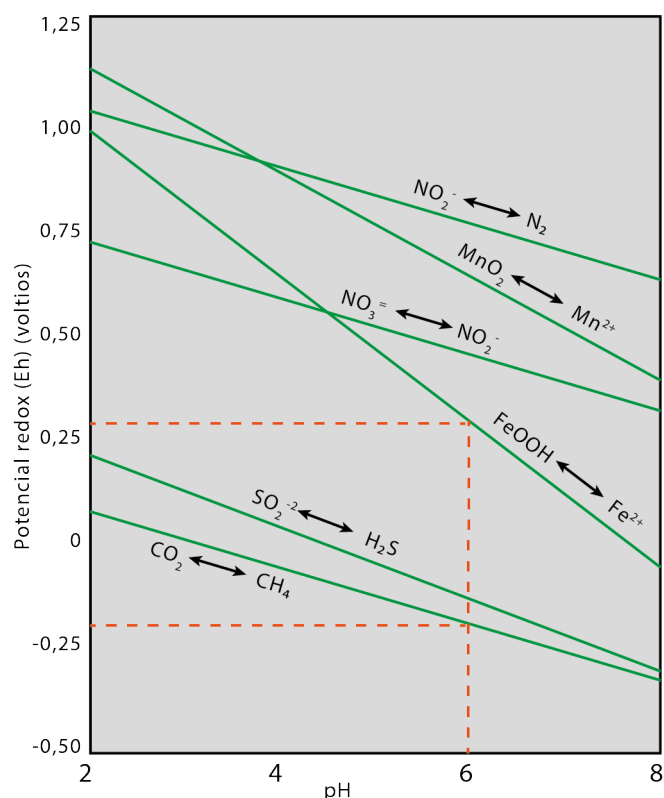


Figura 11: Efecto del pH en los potenciales redox de varias reacciones importantes que se producen en los suelos. Fuente: Adaptado de Brady and Neil (2008)

11. BIBLIOGRAFÍA

- Baver, L.D.; Gardner, W.H.; Gardner, W.R. Física de Suelos. 1978. Capítulo 6: Aeración del suelo. p. 243-265.
- Bohn, H.L.; Mc Neal, B.L.; O`Connor, G.A. 1993. Química del suelo. Capítulo 10: Oxidación y reducción. p. 289-317
- Brady, N.C.; Weil, R.R. The Nature and Properties of Soil. 2008. Capítulo 7: Aireación y Temperatura Del Suelo. p. 265-305
- Foth, H.D. 1992. Fundamentos de la ciencia del suelo. Cap. 3: Propiedades físicas de los suelos. p. 37-74
- Gavande, S.A. 1972. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Capítulo 5: Aireación del suelo. P: 107-130.
- Patrick, W.H.; Jugsujinda, A. 1992. Reducción y oxidación secuenciales de nitrógeno inorgánico, manganeso y hierro en suelos inundados. Soil Science Society of American Journal. Vol. 56 N°4. 331-332.
- Picone, L. 2015. El ambiente físico-químico del suelo relacionado con la fertilidad. En Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos (Eds: Etcheverría y García). INTA.
- Porta, J.; López Acevedo, M.; Roquero, C. 1994. Capítulo 14: Aireación del Suelo en Edafología para la agricultura y el medio ambiente. ED Mundi-Prensa. Madrid.
- Taboada. M.A.; Micucci. F.C. 2008. Capítulo 4 en Fertilidad Física de los Suelos (Eds. Taboada M.A. y Alvarez C.R.) FAUBA.

