

IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS EN SOYA*

Jaime Xavier UVALLE-BUENO¹

RESUMEN

El presente trabajo se realizó de 1983 a 1986 en las instalaciones del Campo Experimental "Valle del Yaqui", Sonora. Se recolectaron muestras de suelo de sitios con y sin problema de clorosis en soya, y se analizaron para identificar las propiedades edáficas asociadas con la incidencia de la clorosis en esta leguminosa.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que la clorosis de la soya se relaciona con la existencia de un estrato subyacente a la capa arable, comúnmente llamado "piso de arado", con acumulación de arcilla coloidal, estructura poliédrica, alta densidad aparente, reducido espacio poroso y muy lenta permeabilidad; por lo tanto, con drenaje y aireación deficientes que propician, a través de procesos de precipitación-redisolución y de oxidoreducción, impropios desbalances iónicos en la solución del suelo y desabasto de oxígeno que afectan el crecimiento y desarrollo normal del cultivo, esencialmente en las primeras etapas fenológicas.

Es factible la detección oportuna de áreas con probable problema de clorosis en suelos arcillosos compactados del sur de Sonora, con base en las determinaciones de: densidad aparente ($> 1.3 \text{ g/cm}^3$), espacio poroso ($< 38 \%$), porcentaje de saturación (> 55), permeabilidad ($< 0.04 \text{ cm/hr}$), así como de carbonatos insolubles ($> 5 \%$) en el subsuelo y fósforo asimilable ($> 35 \text{ kg P/ha}$, Bray P-1) en la capa arable.

* Artículo enviado al Comité Editorial del INIFAP Area Agrícola el 18 de agosto de 1993.

¹ Dr. Investigador Nacional en Química de suelos y Fisiología Vegetal. Encargado de la Unidad de Laboratorios del CIANO-INIFAP.

INTRODUCCION

La clorosis o amarillamiento de la soya (*Glycine max* (L.) Merrill) es una enfermedad fisiológica que puede provocar pérdidas que oscilan entre 3 y 100 por ciento del rendimiento comercial medio de grano estimado en 2 toneladas por hectárea, y anualmente afecta una superficie aproximada de 12 mil hectáreas en el sur del estado de Sonora.

En los ciclos agrícolas primavera-verano 1981 a 1984, la clorosis afectó severamente una superficie en promedio de 10 mil hectáreas, en la cual el productor agrícola se vió obligado a eliminar totalmente su siembra de soya. A consecuencia de dicho desorden fisiológico, se perjudicó la economía de alrededor de 3,500 productores de soya y se dejaron de producir 20 mil toneladas de grano de esta leguminosa. Con el precio de garantía actual, la misma superficie afectada provocaría pérdidas de 16 millones de nuevos pesos.

En el sur de Sonora existe una superficie aproximada de 100 mil hectáreas que comprende suelos arcillosos compactados, donde el cultivo de la soya es especialmente susceptible a la clorosis. De ahí que se considere importante obtener un mejor conocimiento de las propiedades del suelo y sus interacciones con el agua, la planta y el clima, que permita reducir las pérdidas en rendimiento y establecer bases firmes para comprender dicho fenómeno.

Objetivos, metas, hipótesis y supuestos

Se plantearon los objetivos y metas siguientes: Determinar cuali y cuantitativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo que más contribuyen a la incidencia de la clorosis en soya. Establecer a corto plazo una metodología sencilla y práctica que permita detectar oportunamente áreas con probable problema de clorosis para soya.

Hipótesis. La clorosis o amarillamiento de la soya está probablemente muy relacionada con la existencia de un horizonte o estrato de suelo con acumulación de arcilla coloidal, mal estructurado y con alta densidad aparente, y, por lo tanto, con drenaje y aireación deficientes que propician a través de procesos de oxido-reducción, impropios desbalances iónicos en la solución del suelo durante las primeras etapas fenológicas del cultivo, afectando así su buen crecimiento y desarrollo.

Supuestos. La técnica de muestreo diferencial o de juicio, en suelos con y sin problema de clorosis, es la adecuada para identificar las propiedades fisicoquímicas de los suelos asociadas con la incidencia de la clorosis en soya.

REVISION DE LITERATURA

La clorosis es el síntoma visible de pérdida del color verde en la planta debido a la restricción en la síntesis de clorofila y/o degradación de ésta, por diversas alteraciones metabólicas, que pueden ser de naturaleza fisiológica, nutricional o parasitaria, y cuya frecuencia e intensidad depende de la interacción de los factores de la relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

A través del tiempo, diversos autores han presentado evidencias que indican la relación de algunas propiedades del suelo con la incidencia de clorosis en distintas especies vegetales.

Thorne *et al.* (29) en 1950, para explicar la relación entre los hechos observados y la ocurrencia de la clorosis en suelos calcimórficos, discutieron las hipótesis siguientes:

- 1) Alto pH y cantidad excesiva de carbonatos hacen que el fierro del suelo esté menos disponible para las plantas.
- 2) Alta humedad del suelo, pobre aireación y temperaturas extremas del ambiente, perturban el metabolismo vegetal, de tal modo que el fierro es inactivado.
- 3) Los fosfatos pueden precipitar el fierro, ya sea en el suelo o en el tejido vegetal.
- 4) Alto contenido de manganeso en el suelo o en la planta pueden llevar al fierro a un estado oxidado.

Las deficiencias de fierro y otros micronutrientes se propician cuando el pH es superior a 7.8, y hay un alto contenido de CaCO_3 y un bajo nivel de materia orgánica, según consignó Abadía (1) en 1952.

La relación de la clorosis con el deterioro de las propiedades físicas del suelo se puede explicar a través de los estudios sobre la dinámica de la agregación del suelo conducidos en Wisconsin por Harris, Chester y Allen (13), quienes en 1965 manifestaron que la agrupación de las partículas del

suelo en agregados estables es esencial para la obtención de una óptima estructura del suelo, sobre todo en suelos sujetos a períodos intermitentes de humedecimiento a través del año. Suelos bien agregados proveen: una tracción estable para los implementos agrícolas, adecuadas condiciones físicas para la penetración, crecimiento y distribución radical, así como buen drenaje y moderada retención del agua. Estas condiciones evitan la existencia de un régimen desfavorable de aire-humedad para el crecimiento vegetal y la actividad microbiológica, que generalmente se manifiesta como clorosis. Además, estos mismos autores atribuyen, gran importancia a la influencia de los sistemas de producción sobre la agregación del suelo.

De acuerdo con lo aseverado por Wallace y Lunt (39) en 1960, un 25 a 30 por ciento de los suelos de la superficie continental son calcimórficos y, por lo tanto, representan una considerable área potencialmente susceptible a problemas de indisponibilidad de hierro asimilable para las plantas, sobre todo en aquellas regiones donde la precipitación pluvial es inferior a los 500 mm. Así, Cook (6) en 1966 no dudó en señalar que la clorosis de la vid es inducida por la cal, argumentando que este fenómeno tiene su máxima manifestación en los suelos calcimórficos y con pH alto, donde la concentración de carbonatos es tan alta que dificulta la toma de hierro por la planta, lo que afecta por tanto su crecimiento.

Si bien la indisponibilidad de hierro puede suceder con mayor frecuencia en suelos ricos en carbonatos, Pérez-Zamora (24) en 1973 indicó que también se observa en suelos pobremente drenados y suelos ricos en manganeso. Mencionó este autor que la incidencia de la clorosis también es influenciada por la inundación, el exceso de fertilización fosfatada o bien por fechas de siembra inadecuadas que exponen al cultivo a temperaturas ambientales menores de 0 °C ó mayores de 40 °C, en etapas críticas de su desarrollo, y agregó un elemento más, la presencia de ciertos hongos y nematodos del suelo.

Aparte de considerar la alta reacción del suelo y alto contenido de fósforo, Fregoni (10) en 1978 consignó que la acumulación de arcilla torna más severa la clorosis en suelos calcimórficos y/o pobres en hierro.

La clorosis es raro que pueda atribuirse a una escasez de hierro total, ya que éste constituye el 4.2 por ciento de la corteza terrestre y entre todos los elementos ocupa el cuarto lugar en abundancia en el suelo. Sin embargo, aun cuando las plantas requieren pequeñas cantidades de alrededor

de 100 ppm de hierro para su buen crecimiento y éste abunda en el suelo, su deficiencia es la más generalizada entre los micronutrientes y con frecuencia llega a limitar seriamente el desarrollo y productividad de las plantas. Este hecho aparentemente contradictorio, según explicaron Alcalde *et al.* (2) en 1980, se debe al gran número de factores que pueden afectar su asimilación.

Los resultados de investigaciones más recientes vienen a aclarar parte del problema o a hacer más compleja su naturaleza. Por ejemplo, Perret (25 y 26) en 1981 y 1984, y Perret y Koblett (27) en 1979, al referirse a la clorosis férrica bajo condiciones de exceso de humedad y compactación del suelo, asentaron que la vid puede tolerar altas concentraciones de CO_2 y bajas concentraciones de O_2 , pero no tolera el etileno que producen hongos y bacterias anaeróbicas en una concentración mayor de 1 ppm, porque detiene el crecimiento radical que absorbe hierro, y ocurre así la deficiencia.

En relación con soya, desde 1943 Weiss (40) en Estados Unidos señaló que un gen simple controlaba la expresión de la extrema susceptibilidad de seis líneas de soya que él probó, pero ahora parece que el cultivo en arena dio una falsa indicación de herencia mendeliana simple, debido a la ausencia de factores en el campo que contribuyen a la clorosis, como son: la temperatura ambiental, la concentración de bicarbonatos en el suelo o bien las condiciones de aireación del suelo, según lo consignaron Chaney y Coulombe (5) en 1982, Coulombe, Chaney y Wiebold (7) en 1984 y Fehr (9) en 1984.

MATERIALES Y METODOS

Tomando en cuenta que los terrenos del Campo Experimental "Valle del Yaqui" se ubican en el agrohabitat de barrial compactado descrito por Moreno (20) en 1978, el cual comprende 100 mil hectáreas en el sur del estado de Sonora, en donde se presentan los más severos daños por clorosis en soya, se procedió a recolectar muestras de suelo en las parcelas experimentales para ensayo de variedades de soya, así como en parcelas para prueba de fechas y densidades de siembra de esta leguminosa.

La toma de muestras se realizó de acuerdo con la guía elaborada por Uvalle (32) en 1985. Se muestreó el suelo y subsuelo inmediatamente abajo de las plantas con y sin clorosis. De un pozo de 60 centímetros de profun-

didad, con una pala recta se tomó una "rebanada" del suelo desde la superficie hasta la profundidad de 20 ó 30 centímetros, y para el subsuelo se tomó la capa compactada subyacente de 20-60 centímetros en 1983, 30-60 centímetros en 1984 y 20-40 y 40-60 centímetros en 1985. En cada uno de los ciclos agrícolas primavera-verano se muestrearon 40 sitios de plantas con clorosis y 40 sitios de plantas sin clorosis. De cada cinco sitios se elaboró una muestra compuesta.

En las muestras compuestas se realizaron las siguientes determinaciones físicas: color del suelo, densidad aparente, espacio poroso, consistencia, estabilidad de agregados, permeabilidad, textura y estructura; así como las determinaciones químicas de: pH, relación C/N, carbonatos insolubles, fósforo, potasio, calcio y magnesio asimilables, micronutrientes totales y disponibles, además del análisis del extracto de saturación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados, los análisis físicos y químicos del suelo se presentan por separado. Los valores que se incluyen en los cuadros corresponden a promedios de ocho muestras de suelo compuestas de cinco submuestras cada una.

Análisis físico

Color del suelo. Con base en la escala de colores de suelo de Munsell (22), dada a conocer en 1977, no se observaron cambios del color café en seco-húmedo (7.5 YR 5/2-5/4) entre profundidades ni entre localidades, como tampoco entre suelos con plantas con y sin clorosis.

Densidad aparente y espacio poroso. En la capa arable prácticamente no se apreció diferencia en densidad aparente y espacio poroso entre los sitios con y sin problema de clorosis. Sin embargo, en el subsuelo la densidad aparente de los sitios con clorosis fue mayor que en los sitios sin clorosis; consecuentemente, en los sitios con clorosis fue evidente la reducción en espacio poroso (Cuadro 1).

Richards (28) en 1974 citó que las reducciones en el espacio poroso están relacionadas con disminuciones en la permeabilidad.

CUADRO 1. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS EN SOYA. DENSIDAD APARENTE (g/cm^3) Y ESPACIO POROSO (%) CEVY-INIFAP. 1986.

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo agrícola primavera-verano		
		1983	1984	1985
0-20	con	1.20 (53)		1.21 (49)
	sin	1.20 (53)		1.18 (49)
0-30	con		1.18 (50)	
	sin		1.20 (49)	
20-40	con			1.36 (42)
	sin			1.28 (47)
20-60	con	1.30 (44)		
	sin	1.22 (48)		
30-60	con		1.32 (44)	
	sin		1.22 (47)	
40-60	con			1.30 (46)
	sin			1.21 (49)
Localización		Manzana 910 Lote F-9	Manzana 810 Lote D-1	Manzana 710 Lote A-11

Consistencia. Se define como la resistencia de un material a la deformación o ruptura, en este caso el suelo, por las fuerzas de la labranza. La consistencia se juzga tanto en seco y húmedo, como en muy húmedo. En acatamiento a ello, en este trabajo la capa arable se caracterizó como dura en todos los casos, y en el subsuelo como muy dura para los sitios con y sin problema de clorosis. En húmedo, la consistencia resultó friable en la capa superficial y firme o muy firme en el estrato subyacente, muy firme sobre todo en los sitios con clorosis. Cuando muy húmedo, el suelo se comportó indistintamente plástico y su pegajosidad varió de ligeramente pegajoso a pegajoso.

La consistencia se determinó de acuerdo al manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo, propuesto por Cuanalo De la Cerda (8) en 1975.

Estabilidad de agregados al agua. Sekera, citado por Kuntze *et al* (14) en 1981, manifestó que la estabilidad de los agregados al agua tiene

grandes efectos en la economía del agua, aire y calor del suelo, y que estas variaciones son cíclicas, es decir, estacionales.

De acuerdo con la clasificación de Sekera, la estabilidad del suelo en la capa arable corresponde a muy baja o sea clase seis, y muy alta o alta en el subsuelo, clases uno y dos respectivamente, independientemente del aspecto de las plantas.

Permeabilidad. Se denomina así a la capacidad del suelo para transportar agua o aire en todo su perfil, lo que es de vital importancia en la agricultura, especialmente en las tierras de regadío.

Mediante la instrumentación de la metodología sugerida por Palmer y Troeh (23) en 1979, se evaluó la permeabilidad, resultando ésta generalmente rápida en la capa arable, tanto en sitios con plantas sanas como con clorosis. En el subsuelo de sitios con plantas sanas la permeabilidad fluctuó de moderada a lenta, pero en los sitios con plantas cloróticas tuvo una drástica reducción, ya que ni una sola gota de percolado se logró de las columnas de percolación en un tiempo de 24 horas. En el Cuadro 2 se observa que, de acuerdo con el muestreo realizado a tres profundidades en 1985, el estrato compactado con severa limitación de permeabilidad se ubica entre los 20 y 40 centímetros de profundidad en los sitios con plantas cloróticas, pues en la capa subsiguiente de 40 a 60 centímetros, aun en los sitios con clorosis se mejora la permeabilidad.

CUADRO 2. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS EN SOYA. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/hora o cm/día). CEVY, INIFAP. 1986.

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo agrícola primavera-verano		
		1983	1984	1985
0-20	con	M.R. (12.8 cm/hora)		M.R. (12.5 cm/hora)
	sin	R. (14.5 cm/hora)		M.R. (13.2 cm/hora)
0-30	con		M.L. (1.19 cm/hora)	
	sin		M. (3.15 cm/hora)	
20-40	con			M.L. (0.00 cm/día)
	sin			M.L. (0.53 cm/hora)

Continúa Cuadro...

Continuación Cuadro 2..

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo agrícola primavera-verano		
		1983	1984	1985
20-60	con	$\bar{M}.L.$ (0.00 cm/día)		
	sin	$\bar{M}.L.$ (0.47 cm/hora)		
30-60	con		$\bar{M}.L.$ (0.00 cm/día)	
	sin		L. (0.13 cm/hora)	
40-60	con			$\bar{M}.L.$ (1.25 cm/hora)
	sin			$\bar{M}.$ (2.15 cm/hora)
Localización		Manzana 910 Lote F-9	Manzana 810 Lote D-1	Manzana 710 Lote A-11

Símbolos: $\bar{M}.L.$ = Muy lenta; L. = Lenta; M.L. = Moderadamente lenta; M. = Moderada; M.R. = Moderadamente rápida; R. = Rápida.

El incremento de la densidad aparente, la reducción del espacio poroso, la consistencia firme y la muy alta estabilidad de agregados al agua, son propiedades que en su conjunto finalmente se expresaron en una restringida permeabilidad del subsuelo, afectando las condiciones de aireación y drenaje y, consecuentemente, la relación agua-suelo-plantas en los sitios con clorosis.

La dificultad de encontrar en la literatura mundial una escala para clasificar específicamente los suelos compactados del sur de Sonora en cuanto a su permeabilidad, condujo a elaborar una escala propia para los suelos de esta región (Cuadro 3). Se considera que esta escala será de gran utilidad para identificar a tiempo áreas en las cuales la soya pueda ser susceptible al daño por clorosis; sin embargo, su utilización puede extenderse a suelos compactados de otras regiones.

CUADRO 3. ESCALA PROPUESTA PARA CLASIFICAR LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN LOS SUELOS DE MEXICO.

Clase	cm/hora	cm/día	Descripción (Símbolo)
I	< 0.04	< 1	Muy lenta ($\bar{M}.L.$)
II	0.04-0.42	1-10	Lenta (L.)
III	0.43-1.67	11-40	Moderadamente lenta (M.L.)

Continúa Cuadro...

Continuación Cuadro 3

Clase	cm/hora	c m/día	Descripción (Símbolo)
IV	1.68-4.20	41-100	Moderada (M.)
V	4.21-12.60	101-300	Moderadamente rápida(M.R.)
VI	12.61-25.20	301-600	Rápida (R.)
VII	> 25.20	> 600	Muy rápida (M̄.R.)

Fuente: Uvalle-Bueno, J.X. 1985. *Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas Agrícolas*. CEVY-CIANO-INIFAP.

Textura. Del análisis mecánico se desprende que el suelo estudiado presenta textura arcillosa y, según el sistema de clasificación de textura del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, no se detecta diferencia al comparar las muestras de suelo procedentes de sitios con plantas de soya sanas o con síntomas de clorosis. Sin embargo, es factible observar la diferencia si se realiza un análisis mecánico más detallado y se sigue el sistema de Mohr (19) establecido en 1959, que permite registrar subfracciones menores de 0.002 mm (Cuadro 4). Así, es evidente que en el subsuelo de los sitios con clorosis la relación de las subfracciones de arcilla (0.002-0.0005/< 0.0005 mm) es menor que en los sitios sin clorosis y eso conlleva a una reducida conductividad hidráulica o permeabilidad. En la Figura 1 se presenta la correlación de la relación de subfracciones y la permeabilidad.

CUADRO 4. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS DE LA SOYA. TEXTURA Y PORCENTAJE DE SUBFRACCIONES MENORES DE 0.002 mm. CEVY, INIFAP. 1986.

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo primavera-verano		
		1983 Textura	1984 Textura	1985 Textura
0 - 20	con	Arcilla (29-17)*		Arcilla (29-17)
	sin	Arcilla (31-15)		Arcilla (30-16)
0 - 30	con	Arcilla (20-26)		
	sin	Arcilla (25-21)		

Continúa Cuadro...

Continuación Cuadro 4

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo primavera-verano		
		1983 Textura	1984 Textura	1985 Textura
20 - 40	con sin			Arcilla (20-27) Arcilla (11-36)
20 - 60	con sin	Arcilla (12-34) Arcilla (18-28)		
30 - 60	con sin		Arcilla (14-33) Arcilla (17-30)	
40 - 60	con sin			Arcilla (24-23) Arcilla (27)
Localización		Manzana 910 Lote F-9	Manzana 810 Lote D-1	Manzana 710 Lote A-11

*Sistema de Mohr: primera cifra, 0.002 a 0.0005 mm; segunda cifra, menor de 0.0005 mm.

Estructura. En los suelos analizados se determinó que la capa arable posee una estructura subpoliédrica poco agregada y con buena capacidad para el desarrollo radical, pero en el subsuelo se registró un horizonte B rico en arcilla fina, con estructura poliédrica, el cual representa un obstáculo para la permeabilidad al agua y al aire, así como para la profundización de las raíces. Sin embargo, la observación visual de la estructura por sí misma no permite diferenciar los sitios de suelo con o sin clorosis en soya.

Análisis químico

Reacción del suelo (pH). Con el fin de confirmar la influencia del pH en el desarrollo de la clorosis en soya se contrastaron muestras de suelo de sitios con y sin problema de clorosis, y resultó que, independientemente del origen de la muestra, el pH varió de ligera a medianamente alcalino (7.4 a 8.4) tanto en la capa arable como en el subsuelo. Boos (4) en 1982 tampoco consignó un efecto directo del pH en la clorosis de la vid.

Relación C/N. En los sitios de plantas sanas sin clorosis la relación C/N varió de 12 a 13 en la capa arable y de 12 a 14 en el subsuelo, con lo cual se clasifica como media, según los criterios enunciados por Mückenhausen

(21) en 1982. Por otro lado, en los sitios con plantas cloróticas la relación C/N fue alta y varió de 15 a 16 en la capa arable y de 16 a 18 en el subsuelo, es decir, en los sitios con clorosis la relación C/N fue más amplia.

Carbonatos insolubles. En todos los casos se pudo establecer una estrecha relación entre el contenido de CaCO_3 del suelo y la incidencia o no de la clorosis en la planta de soya (Cuadro 5).

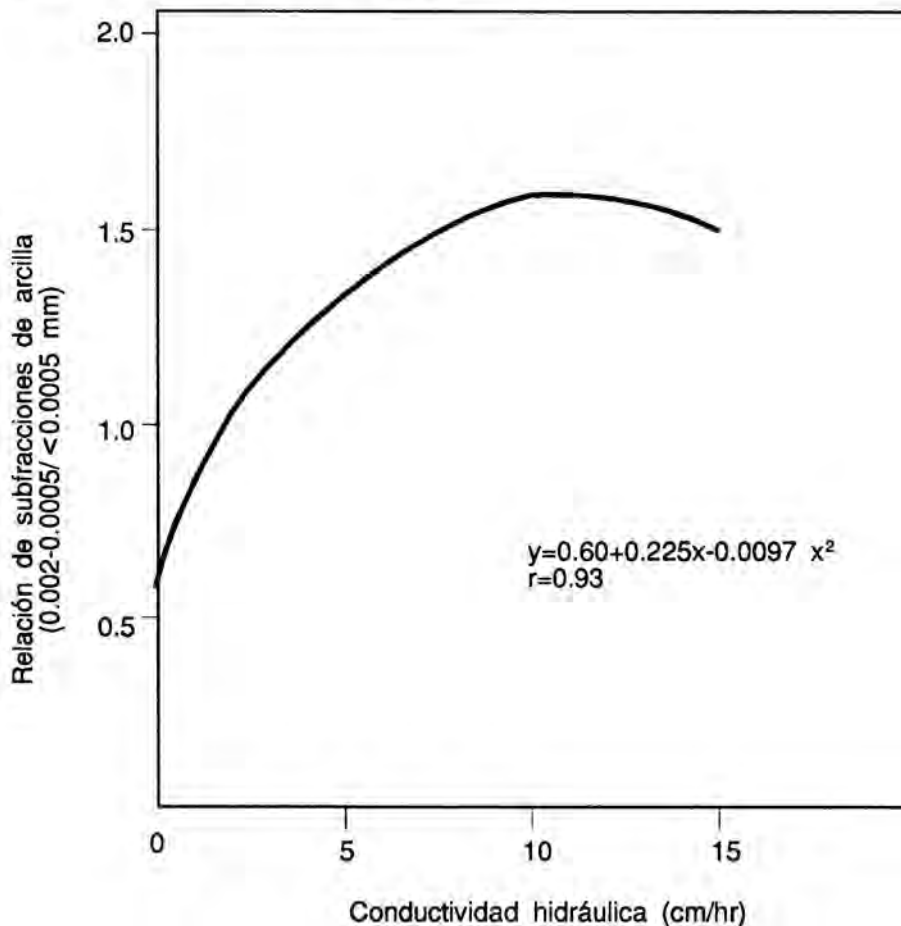


Figura 1. Correlación de la relación de subfracciones de arcilla (0.002-0.0005 / <0.0005 mm) y la conductividad eléctrica del suelo (cm/hr). CEVY, INIFAP. 1986.

CUADRO 5. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS DE LA SOYA. CARBONATOS INSOLUBLES (% CaCO_3). CEVY, INIFAP. 1986.

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo agrícola primavera-verano		
		1983	1984	1985
0-20	con	2.5		3.0
	sin	1.0		0.5
0-30	con		4.0	
	sin		2.0	
20-40	con			5.0
	sin			2.0
20-60	con	7.3		
	sin	3.2		
30-60	con		9.6	
	sin		3.7	
40-60	con			12.4
	sin			5.0

Con el fin de aclarar la controversia entre la presencia de carbonatos y el desarrollo de la clorosis, se considera pertinente citar algunos autores que dan elementos de juicio para comprender por qué en ciertas ocasiones, no obstante haber carbonatos en coincidencia con los otros factores, la clorosis no se presenta, o bien por qué la clorosis se da con mayor frecuencia e intensidad en el verano, en suelos con problema de compactación, pH mayor de 7.5 y con variaciones en la humedad entre capacidad de campo y el punto de marchitamiento.

Fregoni (11) en 1980 señaló que en suelos calcimórficos el hierro reacciona con el carbonato de calcio y forma carbonato ferroso, el cual luego se oxida a carbonato férrico afectándose así la disponibilidad de hierro. Sin embargo, enfatizó que no todos los tipos de carbonato causan clorosis y que la intensidad de ésta puede variar según el tipo y forma de cristalización de los carbonatos, y asocia el incremento en el grado de clorosis de nulo a muy fuerte de acuerdo con la serie mineralógica siguiente: dolomita > hidromagnesita > aragonita > cal-cita > magnesita. Esto explica por qué en ocasiones en suelos con más de 10% de dolomita no hay clorosis, y sí hay en suelos con 5% de calcita ó 2.5% de magnesita.

De acuerdo con lo expresado por Lindsay (15) en 1986, la precipitación y redisolución de los carbonatos se describen por lo general en términos de relaciones de equilibrio químico e indican que en calcita la sustitución de calcio por magnesio condujo a la formación de magnesita y esta sustitución puede ser mayor de 10 por ciento si en la solución del suelo la relación Mg:Ca es mayor de 4. También señaló que la disolución de magnesita se da a pH mayor (>8.2) que para calcita, cuando la disponibilidad de hierro se ha reducido considerablemente y la estructura del suelo se ha deteriorado, de ahí que haya una mayor relación de la magnesita con el grado de clorosis, según el criterio mencionado por Fregoni (11) en 1980.

Kuntze *et al.* (14) en 1981 manifestó que la precipitación química de los carbonatos, ya sea por hidrólisis o por efectos ácidos, se relaciona con las propiedades físicas del suelo, de tal manera que cuando las condiciones de aireación y drenaje se hallan restringidas por compactación, se incrementa la presión parcial de CO₂ en la solución del suelo, lo que provoca una mayor capacidad de disolución de los carbonatos. Estos autores señalaron que un aumento en la presión parcial de CO₂ de 0.0033 a 1.0 bar en la solución del suelo incrementa la solubilidad de los carbonatos de calcio de 117 a 900 mg/l de agua. Asimismo, indicaron que la pérdida de CO₂ o bien el aumento en la temperatura hacen decrecer la solubilidad y conducen de nuevo a la precipitación de Ca CO₃. Este ritmo de disolución-precipitación se vuelve más intenso en el verano, lo cual explica en parte por qué precisamente en las siembras tardías de soya que se realizan después del 10 de junio en el sur de Sonora, el daño por clorosis es más severo.

Según aclararon Mengel y Kirby (18) en 1982, el factor más importante en la clorosis inducida por sales de calcio son los iones bicarbonato HCO₃⁻, que tienden a acumularse debido al pH alto y la disolución de carbonatos en el suelo según la reacción: CaCO₃ + CO₂ + H₂O ----- Ca⁺² + 2HCO₃⁻. En dicha reacción el CO₂ proviene de la respiración radical y de la actividad microbiana.

Los mismos autores agregaron que en terrenos carentes de estructura y con altos contenidos de humedad se pueden alcanzar concentraciones de HCO₃⁻ de 400 a 500 ppm, con lo cual se favorece la inducción de la clorosis férrica. Por su parte, Mengel, Scherer y Malissiovas (17) 1979, detectaron acumulaciones de iones bicarbonato HCO₃⁻ en suelos calcimórficos inundados debido al escaso drenaje y explicaron que la clorosis férrica en vid había sido provocada no por falta de hierro en la solución del suelo sino por la presencia de los iones bicarbonato HCO₃⁻, los cuales al ser

absorbidos por la planta inmovilizan al hierro reduciendo su translocación a las hojas jóvenes.

Uvalle (33) en 1986, observó que las plantas de soya presentaban clorosis intervenal en el estrato de síntesis en hojas jóvenes en presencia de iones bicarbonato HCO_3^- , cuando la humedad del suelo varió de capacidad de campo al punto de marchitamiento. Sin embargo, no se desarrolló ésta cuando el régimen de humedad se mantuvo constante en punto de marchitamiento o en inundación, lo cual lleva a considerar la influencia del potencial de óxido-reducción del suelo (pH) en la incidencia de la clorosis en soya.

P, K, Ca y Mg asimilables. En el presente estudio se pretendió relacionar el contenido de macronutrientes con la incidencia de la clorosis en soya, y sólo en el caso de fósforo fue posible asociar los muy altos contenidos de este nutrimento con el problema de clorosis (Cuadro 6). Respecto a los contenidos de potasio, calcio y magnesio, los suelos tuvieron niveles que oscilaron entre ricos y muy ricos, indistintamente para los sitios con plantas con y sin clorosis.

Boos *et al* (4) en 1982 consignó que las altas concentraciones de fósforo pueden ser considerados como de gran influencia en el desarrollo de la clorosis. Lindsay (15) en 1986 señaló que la aplicación intensa y aislada de fósforo o zinc induce deficiencia de hierro a plantas en suelos calcimórficos.

CUADRO 6. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS DE LA SOYA. FOSFORO ASIMILABLE (P, kg/ha)*. CEVY, INIFAP. 1986.

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo agrícola primavera-verano		
		1983	1984	1985
0 - 20	con	33		36
	sin	23		23
0 - 30	con		34	
	sin		24	
20 - 40	con			27
	sin			18

Continúa Cuadro...

Continuación Cuadro 6

Prof. (cm)	Incidencia de clorosis	Ciclo agrícola primavera-verano		
		1983	1984	1985
20 - 60	con	26		
	sin	21		
30 - 60	con		26	
	sin		19	
40 - 60	con			11
	sin			11

* Método de Bray

P¹

Uvalle-Bueno y Cortés (35) en 1984, en suelos calcimórficos del Valle del Yaqui, Sonora, encontraron que bajo condiciones de campo e invernadero la interacción P/Zn no ejerció un efecto directo en el desarrollo de la clorosis.

En relación con potasio, Uexküll y Jacob (30) en 1973 manifestaron que en suelos pesados con mal drenaje se restringe la toma de potasio y esto a su vez puede provocar una deficiencia fisiológica de hierro. Uvalle-Bueno y Rubio (36) en 1984, en suelos con problema de clorosis en soya donde probaron el efecto de altas dosis de potasio (400 a 1,600 kg K₂O/ha) para corregir este desorden, observaron que la clorosis persistió y que el rendimiento de grano se redujo con el incremento en el nivel de potasio. Lo anterior está de acuerdo con lo expresado por Hahlin (12) en 1973, según lo cual con una relación K/Mg <1, de la forma intercambiable, una fertilización con potasio siempre conducirá a incrementos en el rendimiento y, por el contrario, una relación K/Mg >3 provocará solo efectos negativos de la fertilización potásica, independientemente del nivel de potasio.

Micronutrientos. Lucas y Knezek (16) en 1972 en América y Bergman y Naubert (3) en 1976 en Europa, indicaron que el pH alcalino, la escasez de materia orgánica, y el alto contenido de fósforo y Ca CO₃, así como la compactación y exceso de humedad en el suelo, son algunos de los factores que pueden contribuir a la deficiencia de micronutrientos en las plantas.

En este estudio, el análisis físico del suelo evidenció el deterioro de las propiedades físicas, y el análisis químico reveló altos contenidos de fósforo

y CaCO_3 , aunados a un pH alcalino y pobre contenido de materia orgánica. De ahí que se consideró conveniente incluir la determinación de los microelementos para ver si era factible relacionar sus contenidos en el suelo con el desarrollo de la clorosis en las plantas de soya.

En 1983 se determinó el contenido total de microelementos con el fin de conocer la magnitud de la reserva de ellos en el suelo. Los resultados mostraron que se encuentran en cantidades adecuadas para satisfacer la demanda de cualquier cultivo, de ahí que sea el factor intensidad, y no el de capacidad en el abasto de micronutrientes, el aspecto más importante (Cuadro 7).

CUADRO 7. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS EN SOYA. CONTENIDO TOTAL DE MICROELEMENTOS (ppm). CEVY, INIFAP. 1986.

Incidencia de clorosis	Profundidad (cm)	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
con	0 - 20	38	20	24,600	450	2.5	60
sin	0 - 20	38	20	24,600	450	2.5	60
con	20 - 60	43	20	24,600	450	2.5	60
sin	20 - 60	43	20	24,600	450	2.5	60

La determinación de la fracción extractable de los microelementos, ya sea con soluciones de quelatos o bien con ácidos inorgánicos diluidos en el caso del Cu, Fe, Mn y Zn, lo mismo que la extracción de B y Mo con agua caliente, no permitió identificar suelos con deficiencia de microelementos B, Cu, Fe, Mn y Mo excepto de Zn en DTPA. Sin embargo, no se pudo establecer diferencia entre los sitios con y sin clorosis.

Durante tres años, de 1983 a 1986, las cantidades extraídas de microelementos asimilables permanecieron constantes en cada una de las profundidades de suelo evaluados. (Cuadro 8).

CUADRO 8. IDENTIFICACION DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO ASOCIADAS CON LA CLOROSIS EN SOYA. CONTENIDO DE MICROELEMENTOS ASIMILABLES (ppm). CEVY, INIFAP. 1986.

Incidencia de clorosis	Profundidad (cm)	B	Ca	Fe	Mn	Mo	Zn
con	DTPA*	-	1.2	6.4	11	-	0.5
	EDTA	-	0.5	5.0	20	-	1.2
	HCl-H ₂ SO ₄	-	T	4.0	48	-	2.5
sin	H ₂ O-caliente	1.0	-	-	-	0.6	-
	DTPA*	-	1.2	6.4	12	-	0.5
	EDTA	-	0.5	5.0	20	-	1.2
	HCl-H ₂ SO ₄	-	T	4.0	47	-	2.5
	H ₂ O-caliente	1.0	-	-	-	0.6	-
	*Valor crítico para soya		0.2	0.2	4.5	8	0.05

El hecho de que en los sitios de muestreo del suelo las plantas con clorosis tengan mayor contenido de micronutrientes que las plantas sin clorosis, llevó a consignar a Uvalle-Bueno (34) en 1986, que el desorden observado como amarillamiento es de tipo fisiológico, más bien que de tipo nutricional, y que se agudiza en las primeras etapas de desarrollo de la soya (V3) asociándose según se pudo ver anteriormente con un alto contenido de fósforo asimilable y Ca CO₃, así como con el deterioro de las propiedades físicas del suelo.

Extracto de saturación. El análisis del extracto de saturación permite clasificar a los suelos como normales, sin acumulación de sales solubles y/o sodio, tanto en la capa arable como en el subsuelo de sitios con y sin problema de clorosis en soya.

Sin embargo, la determinación del porcentaje de saturación permite señalar cierta diferencia entre los sitios con y sin problemas de clorosis, esencialmente en el subsuelo donde se aprecia un aumento de hasta 8 por ciento en la capacidad de retención de agua, lo cual se explica por la mayor acumulación de arcilla coloidal (subfracción < 0.0005 mm) a que se hizo mención en la determinación de la textura.

Dado que no se encontró un nivel alto de sodio que ponga en peligro las propiedades físicas del suelo, se considera que la compactación del subsuelo es más bien provocada por el paso excesivo de maquinaria agrícola pesada sobre el terreno húmedo, con lo que se induce la formación del comúnmente llamado "Piso de arado" que impide un adecuado crecimiento radical.

Como la compactación no es debida a la defloculación química provocada por un alto nivel de sodio, entre 1983 y 1985 Uvalle-Bueno (37) demostró que la aplicación de mejoradores químicos del suelo no previene ni controla la clorosis en soya. Empero, es conveniente citar que en dicho estudio no obstante la persistencia de la clorosis, el ácido sulfúrico fue el único que logró elevar el rendimiento de grano de soya respecto al testigo sin aplicación de mejoradores. Asimismo, en relación con la salinidad, Uvalle-Bueno *et al* (38) en 1985 consignaron que la salinidad de hasta 10 mmhos/cm del tipo NaCl no se relaciona con la clorosis en los diferentes regímenes de humedad del suelo (punto de marchitamiento, capacidad de campo y saturación). Sin embargo, en 1986 el propio Uvalle-Bueno (33) indicó que con salinidad del tipo NaHCO_3 sí se desarrolla clorosis, pero no cuando se mantiene un régimen de humedad sino cuando se lleva el suelo del 20 al 100 por ciento de humedad aprovechable y viceversa; ello se explica por el incremento del pH, la presencia del ión bicarbonato HCO_3^- , inductor de clorosis, y la variación en el potencial de oxidación-reducción del suelo al variarse el régimen de humedad.

Análisis general de resultados

La observación detallada de los resultados permite establecer que los factores del suelo más estrechamente asociados con la clorosis de la soya son de naturaleza física.

Se comprobó que la causa principal radica en la existencia de un estrato compactado de espesor variable (30 ± 10 cm), subyacente a la capa arable, que presenta acumulación de arcilla coloidal (<0.0005 mm) y estructura poliédrica, su consistencia es muy dura en seco y su estado de agregación es muy friable, es decir, es inestable al agua. El espacio poroso registra disminuciones de hasta 8 por ciento con lo que se afecta severamente la permeabilidad y se incrementa la retención de humedad del suelo; en un principio la conductividad hidráulica es rápida en la capa arable y se

reduce a moderadamente lenta en el subsuelo en los sitios sin clorosis, y en el subsuelo de los sitios con clorosis es prácticamente nula. Esto implica que el agua de riego se infiltra rápidamente en la capa superficial y enseguida ésta se satura debido a la impermeabilidad del subsuelo, con lo que se reduce directamente el abasto del oxígeno para la respiración radical, así como el establecimiento de la simbiosis (en plantas de soya con clorosis no se desarrollan nódulos) y la toma de nutrimentos y en consecuencia se provoca un crecimiento y desarrollo anormal del cultivo.

Desde el punto de vista químico, las propiedades del suelo más relacionadas con el desarrollo de la clorosis fueron el alto contenido de carbonatos CaCO_3 en el subsuelo y de fósforo asimilable en la capa arable.

De acuerdo con las observaciones de campo, la frecuencia e intensidad de la clorosis se manifiesta más severamente al conjugarse los factores siguientes: mayor susceptibilidad genética de la variedad de soya a la clorosis, fecha de siembra tardía, mala densidad de población y aplicación temprana del primer riego de auxilio (V3). También se asociaron con la mayor incidencia de clorosis el uso de semilla de mala calidad, el exceso de fertilización fosfatada y la práctica común de quema de la paja de trigo previa a la siembra de soya.

Dado que la quema de los residuos de la cosecha anterior afecta, a mediano y largo plazo, las propiedades físicas del suelo al reducir el contenido de materia orgánica e incrementar la disponibilidad de fósforo asimilable, factores ambos que favorecen el desarrollo de la clorosis en soya se sugiere que en vez de quemar la paja, ésta se incorpore al suelo agregando algo de fertilizante nitrogenado (50 kg N/ha) para facilitar y asegurar su descomposición.

CONCLUSIONES

La clorosis o "amarillamiento" de la soya se relaciona con la existencia de un estrato de suelo subyacente a la capa arable, comúnmente llamado "piso de arado", con acumulación de arcilla coloidal, mal estructurado, con alta densidad aparente, reducido espacio poroso y muy lenta permeabilidad; por lo tanto, con drenaje y aireación deficientes que propician a través de procesos de precipitación-redisolución y de oxido-reducción, impropios desbalances iónicos en la solución del suelo, y desabasto de oxígeno que afectan el crecimiento y desarrollo normal del cultivo, esencialmente en las primeras etapas fenológicas.

Una vez establecidas las causas de la clorosis en soya inherentes a las propiedades del suelo, es factible la detección oportuna de áreas con probable problema de clorosis en suelos arcillosos compactados con base en los rangos observados para los siguientes variables: densidad aparente ($>1.3 \text{ g/cm}^3$), espacio poroso ($<38\%$), porcentaje de saturación (>55), permeabilidad ($<0.04 \text{ cm/hr}$), CaCO_3 ($>5\%$) en el subsuelo y fósforo asimilable ($>35 \text{ kg P/ha}$, Bray P-1) en la capa arable.

El impacto de la clorosis sobre la pérdida de rendimiento de grano de soya habrá de reducirse substancialmente sí en las áreas con tendencia a la clorosis se atienden aspectos importantes tales como: variedad con mecanismos de adaptación genética a la clorosis, fecha óptima de siembra, buena calidad de semilla y por lo tanto buena densidad de población, así como aplicación moderada de fertilizantes fosfatados y aplicación oportuna del primer riego de auxilio (V6).

LITERATURA CITADA

1. Abadia, C.A. 1952. Deficiencia inducida de hierro en frutales. *An. Inst. Edaf. y Fis. Veg.* 11:641-651.
2. Alcalde, B.S., García, M.H., Mendoza, O.L., y Martínez, G.A. 1980. *Evaluación de tolerancia y susceptibilidad del sorgo Sorghum bicolor Moench a la clorosis férrica*. XIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
3. Bergman, W. y P. Neubert. 1976. *Pflanzen diagnose und Pflanzenanalyse*. VEB. Gustav. Fischer Verlag, Jena, DDR.
4. Boss, A., Kolesch, H. y Hofner W. 1982. Chlorose-ursachen bei Reben *Vitis vinifera* L. am natürlichen Standort. *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.* 145:246-260.
5. Chaney, R.L., y B.A. Coulombe. 1982. Effect of phosphate on regulation of Fe-stress-response in soybean and peanut. *J. Plant. Nutr.* 5:469-487.
6. Cook, J.A. 1966. Grape nutrition in Frandlin, N.CH. ed. *Temperate subtropical tree and small fruits*. New Jersey the State University. Horticultural publications rutgers. p. 777-805.
7. Coulombe, B.A., R.L. Chaney y W.J. Wiebold. 1984. Bicarbonate directly induce Fe-chlorosis in susceptible soybean cultivars. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 48:1297-1301.
8. Cuanalo de la C., H. 1975. *Manual para la descripción de perfiles en el campo*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
9. Fehr, W.R. 1984. Current practices for correcting iron deficiency in plants with emphasis on genetics. *J. Plant Nutr.* 7:347-354.

10. Fregoni, M. 1978. Ruolo degli oligo-elementi nella regolazione dell'accrescimento vegetativo e della fruttificazione (productivita' e qualità) della vite. Problemi diagnostici. *Gruppo giornalistico ed agricolo Vignevine Anno. 8:7-17.*
11. Fregoni, M. 1980. *Nutrizione e fertilizzazione della vite (s.l.)* Edagricole, p.417.
12. Hahlín, M. 1973. Der effekt der Kaliumdüngung hängt vom Verhältnis K:Mg im Boden ab. Vaxt pressen, SUPPRA, informationsavd., Fack, Schweden. 4:6-7.
13. Harris, R.F., G. Chesters y O.N. Allen. 1965. Dynamics of soil aggregation. *Adv. Agron. 7:2-35.*
14. Kuntze, H., J. Niemann, G. Roeschmann y G. Schwerdtfeger. 1981. *Bodenkunde. 2. vollieg neubearb.* Aufl. Stuttgart. Ulmer.
15. Lindsay, W.L. 1986. Soil and plant relationship associated with iron deficiency with emphasis of nutrient interactions. *J. Plant Nutrition. 7:489-500.*
16. Lucas, R.E. y Knezeck, B.D. 1972. *Climatic and soil conditions promoting micronutrients deficiency in plant. In: Micronutrients in Agriculture.* (J.J. Mortvedt, P.M. Giorganano, y W.L. Lindsay, eds.) Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin. p. 265-268.
17. Mengel, K., W.H. Sherer y N. Malissiovas. 1979. Chlorosis with respect to soil chemistry and the nutrition of vines. Austria Miteilungen Klosterneuburg. *Inst. für Pflanzenernährungs Justus von Liebig Universität. 29(4):151-156.*
18. _____ y E.A. Kirrby. 1982. *Principles of plant nutrition* 3 ed. Zwitterland. International Potash Institute. p.643.
19. Mohr, E.C.J. y Van Baren, F.A. 1959. *Tropical Soils.* Inter-Science Publishers Ltd., Londres, Nueva York.
20. Moreno, R., O.H. 1978. *Tipos de suelo propuestos para el área de riego del sur de Sonora. En: Guía para la asistencia técnica agrícola.* CAEVEY, CIANO, INIA, SARH.
21. Mückenhausen, E. 1982. *Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen.* 2. Aufl. Frankfurt am Main. DLG. Verlag.
22. Munsell Soil Color Chrts. 1977. *Munsell color Co. Inc.,* Baltimore, Maryland, U.S.A.
23. Palmer, R.G. y Troeh, F.R. 1979. *Introductory Soil Science Laboratory Manual.* Ames, Iowa, USA.
24. Pérez-Zamora, O. 1973. *Liberación de fierro asimilable, variaciones en las relaciones nutricionales y contenido de clorofila en el maíz H-30, por efecto de inundación y adición de materia orgánica en dos suelos calcáreos.* Tesis de M.C. Colegio de Postgraduados. Chapingo México.
25. Perret, P. 1981. Evidence of increased ethylene content in the soil air of a vineyard with compaction induced chlorosis. *Vitis 20:320-328.*
26. _____. 1984. Soil compaction induced iron chlorosis in grape vineyard: presumed involvement of exogenous soil ethylene. *J. Plant. Nutr. 7(1-5):539-553.*

27. _____ y W. Koblet. 1979. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Sauerstoff, Kohlen dioxid und "Äthylen Gehalt der Bodenluft und dem Auftreten der Rebenchlorose". *Die Wein-Wissenschaft*, 34:151-169.
28. Richards, L.A. 1974. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Editorial Limusa, México.
29. Thorne, D.M., Wann, F.B. y Wilford, R. 1950. Hypotheses concerning lime-induced chlorosis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 15:254-258.
30. Uexküll, H. y A. Jacob. 1973. *Fertilización: nutrición y abonado de lo cultivos tropicales y subtropicales*. Ediciones Euroamericanas, México.
31. Uvalle-Bueno, J.X. 1984. *Respuesta de la soya con problema de amarillamiento, a altas dosis de potasio en suelo compactado bajo condiciones de invernadero. Ciclo primavera-verano*. CAEVY-CIANO-INIFAP. (Reporte Técnico).
32. _____. 1985. *Guía para recolectar muestras de suelo*. CAEVY, CIANO, INIFAP. (Folleto Misceláneo Núm. 3).
33. _____. 1986. *Efecto de cuatro niveles de bicarbonato de sodio en tres condiciones, de humedad del suelo, sobre la incidencia del amarillamiento en soya. Ciclo primavera-verano*. CAEVY-CIANO-INIFAP- (Folleto Técnico).
34. _____. 1986a. *Fisiología y nutrición de la planta de soya, bajo condiciones del esfuerzo causado por la clorosis. Ciclos primavera-verano 1983-1986*. CAEVY-CIANO-INIFAP. (Reporte Técnico).
35. _____ y J.M. Cortés J. 1984. *Influencia de la interacción fósforo-zinc, bajo condiciones de campo, en el amarillamiento de la soya. Ciclo primavera-verano*. CAEVY-CIANO-INIFAP. (Reporte Técnico).
36. _____ y L.M. Rubio S. 1984. *Respuesta de la soya con problema de amarillamiento, a altas dosis de potasio en suelo compactado bajo condiciones de campo. Ciclo primavera-verano*. CAEVY-CIANO-INIFAP. (Reporte Técnico).
37. _____ y _____. 1985. *Evaluación de 6 mejoradores de suelo bajo dos condiciones de manejo de la soya, Cv. Cajeme durante los ciclos primavera-verano 1983-1985*. CAEVY-CIANO-INIFAP. (Reporte Técnico).
38. _____, _____ y M.I.A. García. 1985. *Efecto de cuatro niveles de cloruro de sodio, en tres condiciones de humedad del suelo, sobre la incidencia del amarillamiento en soya. Ciclo primavera-verano*. CAEVY-CIANO-INIFAP. (Reporte Técnico).
39. Wallace, A., y R. Lunt. 1960. Iron chlorosis in horticulture plants. A. Review. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 75:819-841.
40. Weiss, M.G. 1943. Inheritance and physiology of efficiency in iron utilization by soybeans. *Genetics*. 28:253-268.