

7 RESULTADOS

7.1 DESARROLLO DE PLÁNTULAS EN VERMICULITA CONTAMINADA CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE PLOMO Y CADMIO

La selección de las especies evaluadas en el presente trabajo se realizó con base en los estudios efectuados por Hernández (2001) que sugirió el uso de *Phaseolus vulgaris* (frijol) como planta fitoremediadora, lo cual fue corroborado por López (2002) quien además propuso que plantas de *Beta vulgaris* (acelga) y *Petroselinum crispum* (perejil) podrían ser útiles en procesos de fitorremediación.

7.1.1 CULTIVO DE PLÁNTULAS DE ACELGA (*Beta vulgaris*)

Las semillas de acelga germinaron en los tres tratamientos de vermiculita contaminada con plomo y cadmio, denominados T1 (Pb 50mg, Cd 2 mg), T2 (Pb 75mg, Cd 2 mg) y T3 (Pb 150mg, Cd 2 mg), así como en el cultivo control control (CC). El cultivo de acelga no presentó daño físico visible durante su desarrollo. En la Figura 1 se muestra el desarrollo comparativo de las plántulas de acelga durante 26 días.

7.1.2 CULTIVO DE PLÁNTULAS DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L)

Las semillas de frijol, sembradas de acuerdo a lo indicado en materiales y métodos, germinaron en la vermiculita contaminada con plomo y cadmio. En el cultivo de frijol no se observó daño físico visible. La Figura 2 muestra el desarrollo de las plántulas de frijol en los tratamientos aplicados (T1, T2 y T3) y en el cultivo control (CC).

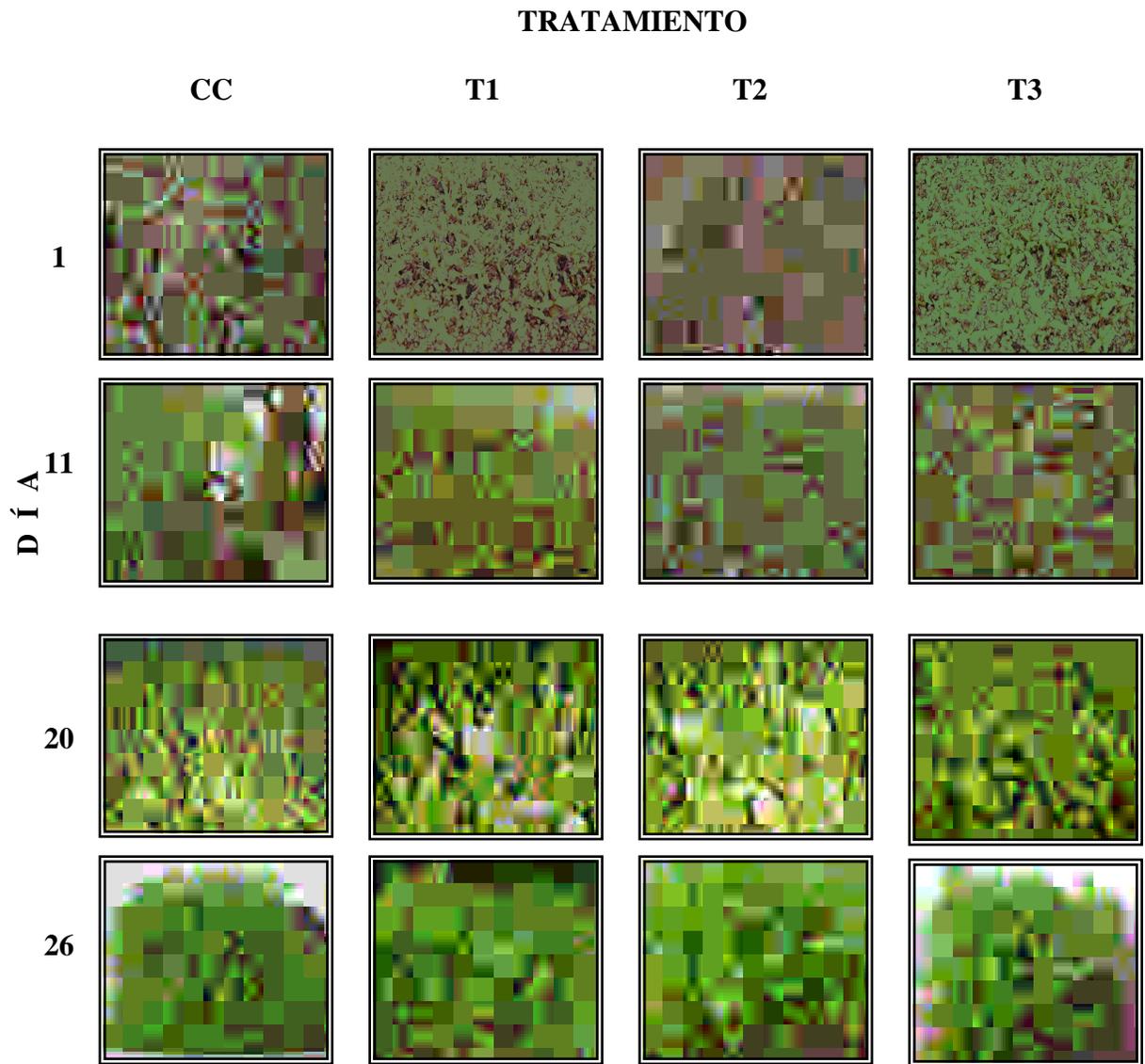


Figura 1. Desarrollo de plántulas de acelga bajo los tratamientos T1 (Pb 50 mg, Cd 2 mg), T2 (Pb 75mg, Cd 2 mg) , T3 (Pb 150mg, Cd 2 mg) y en el cultivo control .

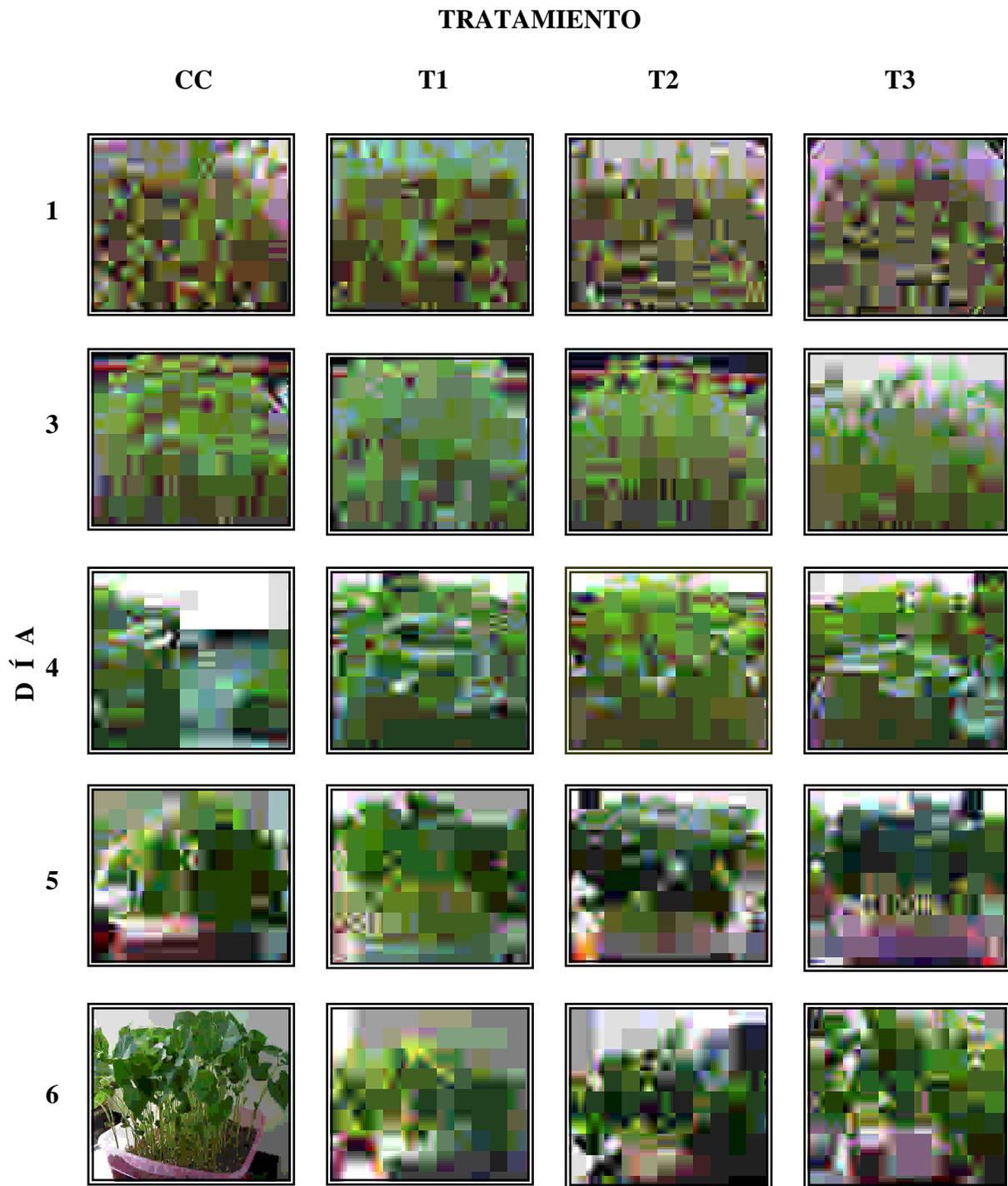


Figura 2. Desarrollo de plántulas de frijol bajo los tratamientos T1 (Pb 50 mg, Cd 2 mg), T2 (Pb 75mg, Cd 2 mg) , T3 (Pb 150mg, Cd 2 mg) y en el cultivo control (CC).

7.1.3 CULTIVO DE PLÁNTULAS DE PEREJIL (*Petroselinum crispum*)

Las semillas de perejil se sembraron en vermiculita aplicando los tratamientos T1,T2 y T3. En la figura 3 se representa gráficamente la germinación de las semillas, como se puede observar el aumento de la contaminación por plomo de 50 mg/kg de vermiculita (T1) a 150 mg/kg de vermiculita (T3) disminuye el porcentaje de semillas germinadas de 62% a 33% en comparación con el cultivo control. Debido al prolongado tiempo de germinación y al bajo número de plántulas desarrolladas (Figura 4) la cantidad de biomasa producida fue insuficiente para realizar las evaluaciones planteadas en los objetivos de trabajo.

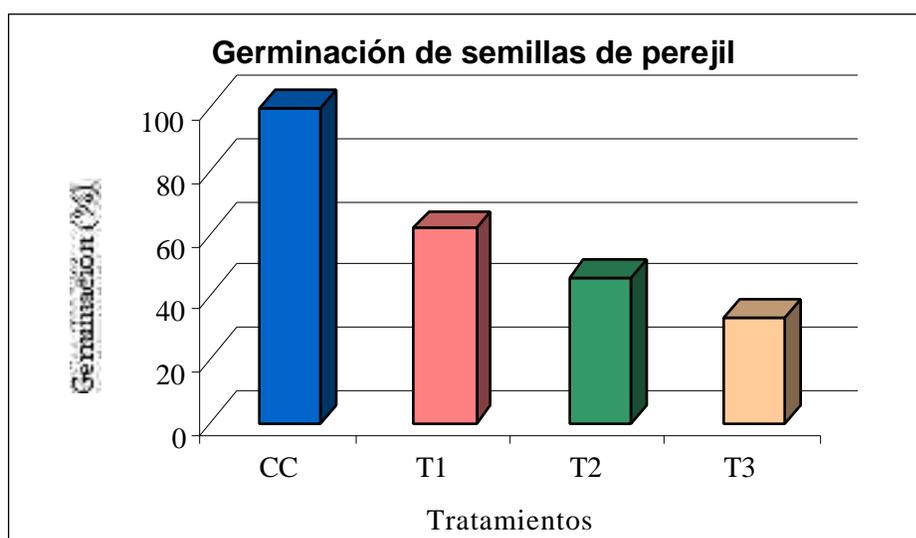


Figura 3. Germinación de semillas de perejil en los tratamientos de cultivo control (CC) , T1 (Pb 50 mg, Cd 2 mg), T2 (Pb 75mg, Cd 2 mg) y T3 (Pb 150mg, Cd 2 mg).

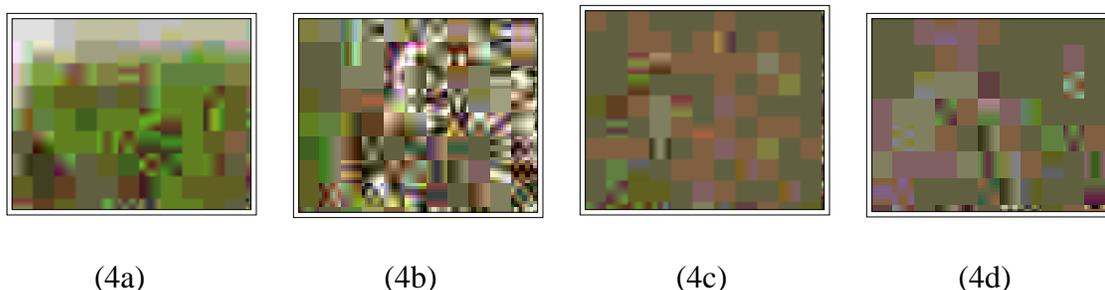


Figura 4. Desarrollo de plántulas de perejil: (4a) cultivo control, (4b) T1, (4c) T2 y (4d) T3.

7.2 ANÁLISIS DEL SUELO

En la Tabla 5 se muestran los resultados de las determinaciones analíticas realizadas al suelo de cultivo.

Tabla 5. Parámetros determinados en el suelo de cultivo.

Parámetro		Unidades
pH	----	8.00
Humedad	%	5.71
Materia Orgánica	%	2.39
Textura	%	Arcilla = 15.8 Arena = 70.92 Limo = 13.28
Nitrógeno Total	%	0.14
Fósforo Extraíble	mg P-Olsen/kg	21.94
Plomo	mg/kg	20.76
Cadmio	mg/kg	0.865

El valor de pH del suelo analizado se situó dentro del intervalo indicado para el cultivo de acelga y frijol. De acuerdo a la norma de referencia, NOM- 021-RECNAT- 2000, el suelo se clasificó como medianamente alcalino (Lomelí y Tamayo, 1992; Porta y col. 1994).

La material orgánica comprende la acumulación de plantas parcialmente desintegradas y descompuestas, residuos animales y otros compuestos orgánicos sintetizados por los microorganismos del suelo; siguiendo los parámetros establecidos por la norma de referencia, el suelo es de contenido medio en materia orgánica (Brady, 1990).

La distinta proporción de arena, limo y arcilla definió la textura del suelo como franco arenosa. El nitrógeno total se determina frecuentemente en los análisis de rutina, constituye una medida de la cantidad de sustrato en proceso de descomposición. Conforme a lo establecido en la norma NOM- 021-RECNAT- 2000, el suelo contenía nitrógeno total a un nivel medio (Black, 1975). El contenido de fósforo extraíble en el suelo es alto de acuerdo con la norma NOM- 021-RECNAT- 2000.

La concentración de Pb en el suelo (antes de su contaminación artificial) se mantuvo dentro de un nivel normal según los límites señalados en la norma NOM- 021-RECNAT- 2000; en el caso del Cd, aún cuando sobrepasó el límite normal, su concentración no llegó al nivel establecido en la misma norma como peligroso.

7.3 DESARROLLO DE PLÁNTULAS EN SUELO CONTAMINADO CON PLOMO Y CADMIO

Al inicio del presente trabajo se propuso el estudio del perejil para determinar su potencial como especie fitorremediadora de suelos contaminados con metales pesados, sin embargo debido a la limitada producción de biomasa obtenida al aplicar los tratamientos T1, T2 y T3, el cultivo de perejil se descarta como especie de estudio en suelo contaminado con plomo y cadmio.

7.3.1 CULTIVO DE PLÁNTULAS DE ACELGA

Las semillas de acelga se sembraron en suelo contaminado con 208.19 mg Pb/kg y 10.04 mg Cd/kg (tratamiento SC). El desarrollo de las plántulas a lo largo del experimento se observa en la Figura 5.

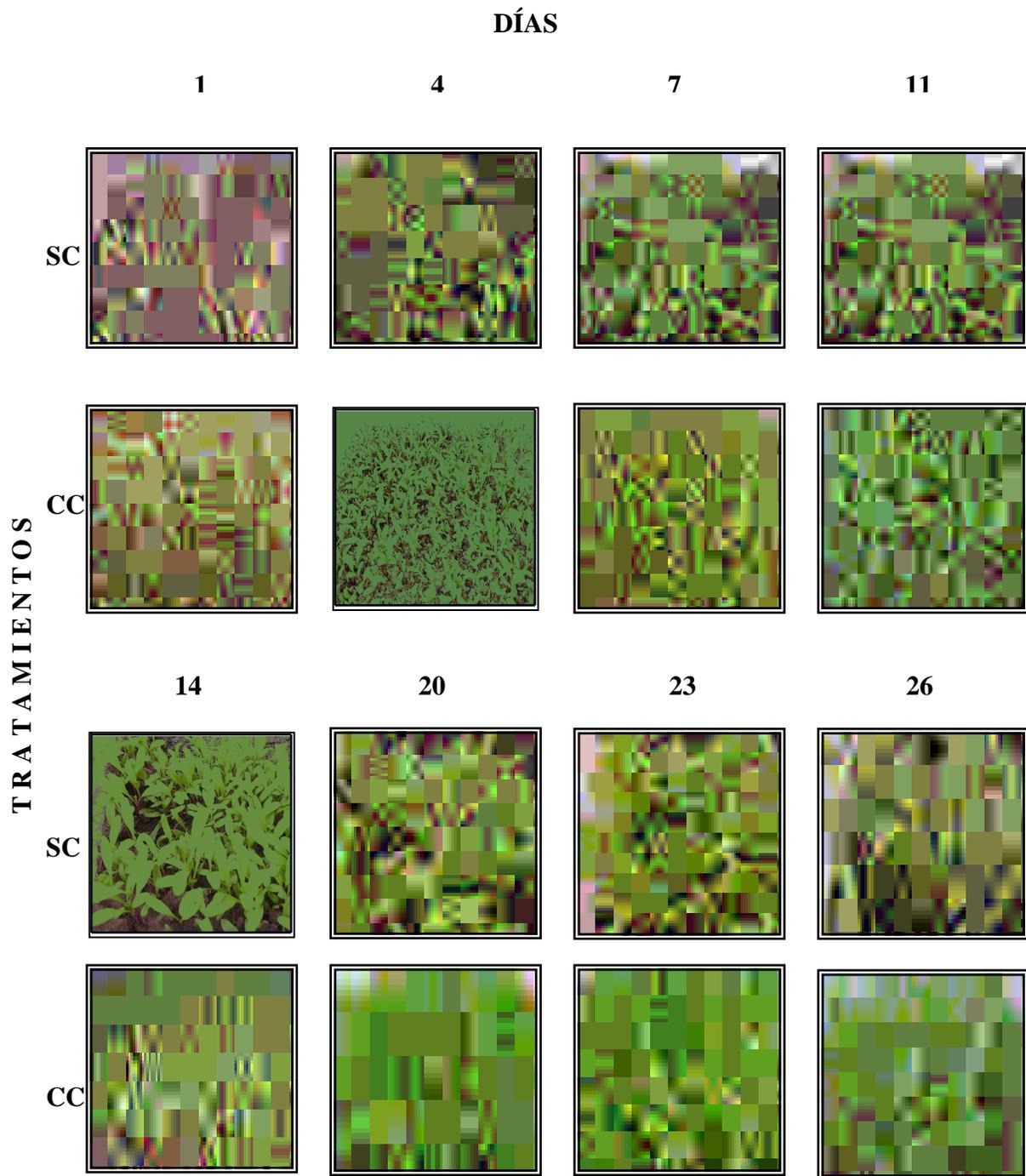


Figura 5. Desarrollo de plántulas de acelga en el cultivo control (CC) y en suelo contaminado (SC) con plomo y cadmio.

7.3.2 CULTIVO DE PLÁNTULAS DE FRIJOL

Las semillas de frijol se sembraron en el suelo contaminado con 208.19 mg Pb/kg y 10.04 mg Cd/kg , denominado tratamiento SC. En la Figura 6 se observa el desarrollo de las plántulas obtenidas.

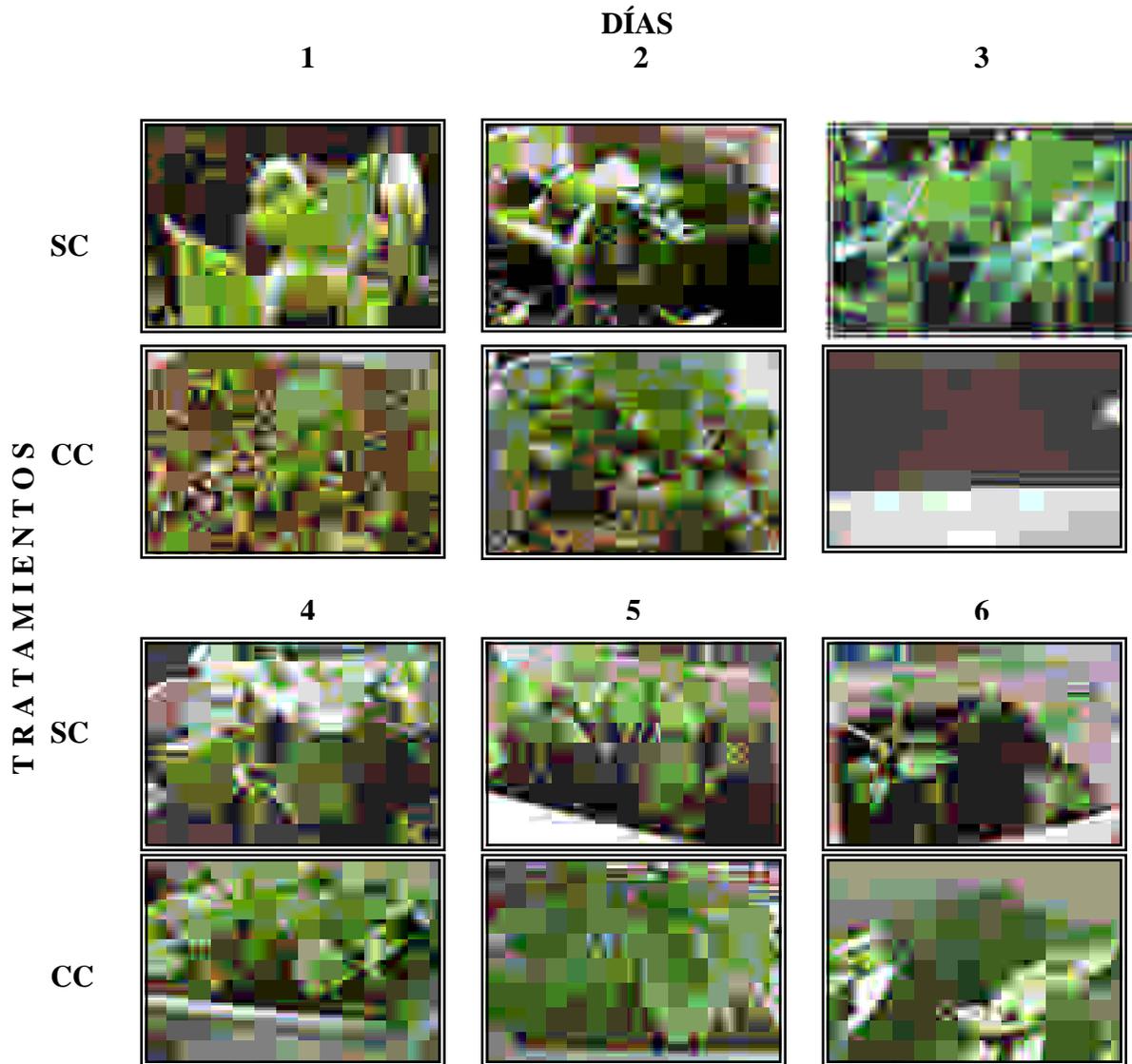


Figura 6. Desarrollo de plántulas de frijol en el cultivo control (CC) y en suelo contaminado (SC) con plomo y cadmio.

7.4 CUANTIFICACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN SEMILLAS

En las semillas de acelga, frijol y perejil se cuantificó el contenido de plomo y cadmio. Como se observa en la Figura 7 estos metales se detectaron en cada tipo de semilla, determinados en un rango de 14.24 (perejil) a 15.02 (acelga) mg Pb/kg de peso seco y de 10.35 (frijol) a 10.79 (acelga) mg Cd/kg de peso seco. Dado que el contenido de metales en las semillas se cuantificó a nivel de trazas, el aporte de Pb y Cd por las semillas no se considera significativo en el presente estudio.

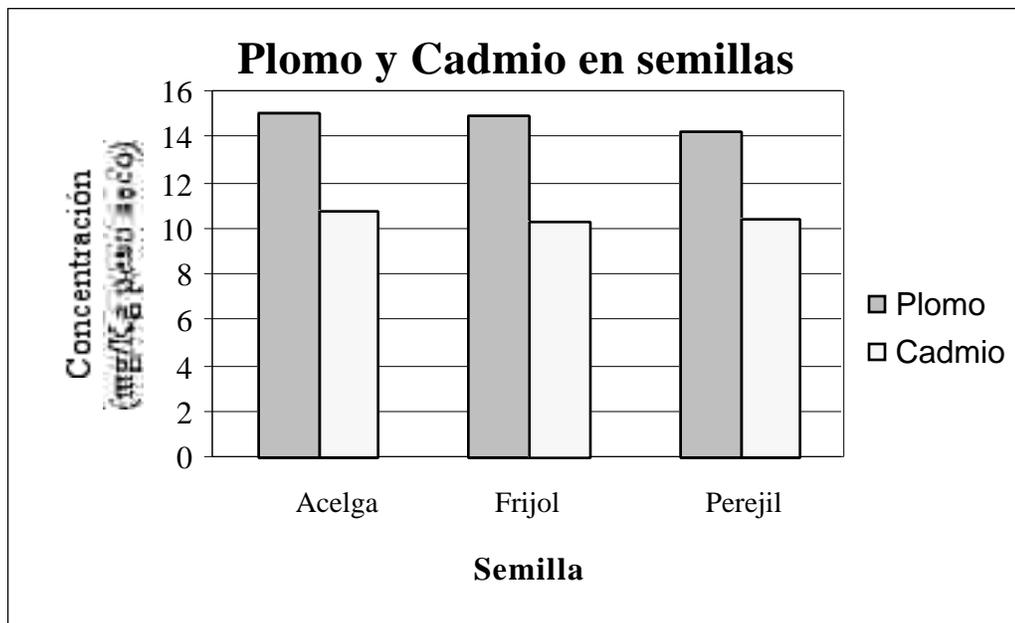


Figura 7. Contenido de plomo y cadmio en semillas de acelga, frijol y perejil.

7.5 CUANTIFICACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN PLÁNTULAS

Debido a que el propósito fue determinar si las plantas provenientes de semillas adquiridas en forma común por el agricultor tenían la capacidad de absorber plomo y cadmio del suelo para almacenarlo en sus tejidos y aún cuando las semillas utilizadas contenían a estos metales, solo consideramos como fuente de contaminación a las soluciones de plomo y cadmio adicionadas a los sustratos de enraizamiento.

A lo largo del tiempo se tomaron muestras de plántulas de acelga y de frijol, las cuales fueron separadas en tallos y hojas (submuestra T/H) así como en raíces (submuestra R). En cada submuestra se determinó la concentración de plomo y de cadmio, expresada como g / kg de peso. La insuficiencia de biomasa producida limitó la cuantificación de los metales por triplicado, por esta razón no se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenido para determinar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados.

7.5.1 ACELGA

Durante 26 días de estudio se tomaron 9 muestras de plántulas de acelga y se procesaron de acuerdo a lo indicado en materiales y métodos.

7.5.1.1 Contenido de Plomo

Se cuantificó a lo largo del tiempo el contenido de plomo en las submuestras de los tratamientos T1 , T2, T3 y suelo contaminado (SC), lo cual se representa en la Figura 8 y se muestra en la Tabla 6. En la Figura 8 se observa que el contenido de plomo en las submuestras tallo/hoja de plántulas de acelga a lo largo del tiempo siguió la misma tendencia independientemente de la concentración aplicada en el sustrato. Durante los primeros 7 días de estudio se incrementó el contenido de plomo en la parte aérea de la acelga (tallo y hojas) hasta un intervalo de 0.76 a 1.10 g/kg de peso seco, esta proporción se mantiene prácticamente constante hasta el día 14, posteriormente se observa el descenso de concentración de plomo en el tejido vegetal que coincide con el desarrollo de las hojas verdaderas.

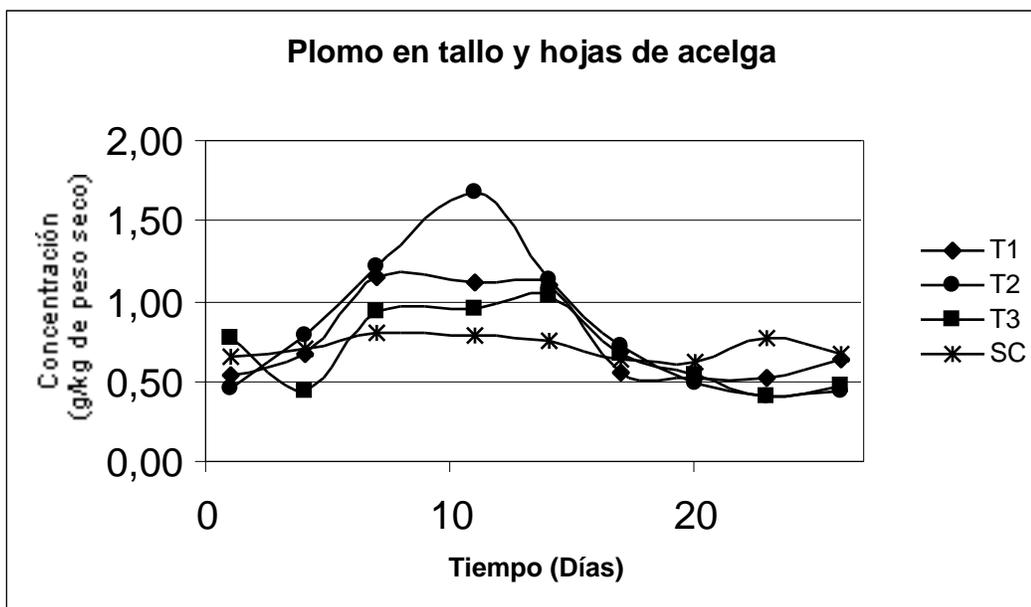


Figura 8. Contenido de plomo en tallo y hojas de plántulas de acelga.

Tabla 6. Contenido de plomo en tallo y hojas de plántulas de acelga.

Tiempo (Días)	Plomo en tallo y hojas de plántulas de acelga (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.54	0.46	0.77	0.66
4	0.68	0.79	0.45	0.72
7	1.15	1.23	0.94	0.81
11	1.13	1.69	0.96	0.79
14	1.10	1.15	1.04	0.76
17	0.56	0.72	0.68	0.64
20	0.53	0.50	0.54	0.62
23	0.52	0.41	0.41	0.77
26	0.64	0.44	0.48	0.67

Se determinó la concentración de plomo almacenada en la raíz de acelga a través del tiempo. Los resultados se representan en la Figura 9 y se muestran en la Tabla 7. Como se observa, la cantidad de plomo almacenada fue similar entre los tratamientos T1, T2 y T3 realizados en vermiculita, manteniendo durante el proceso un intervalo de concentración entre 1.32 y 3.34 g de Pb/kg de peso seco.

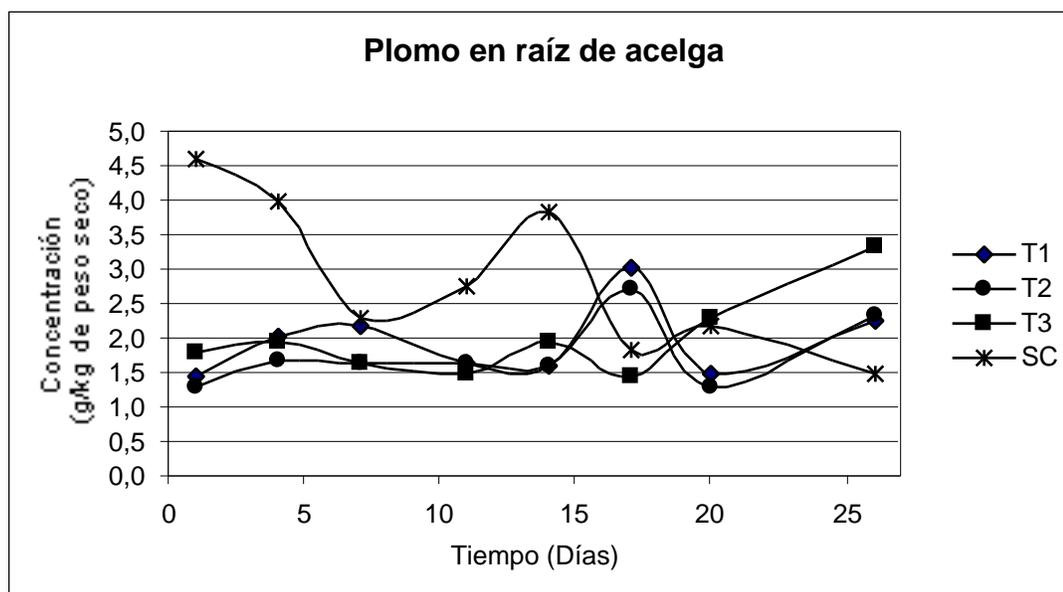


Figura 9. Contenido de plomo en raíz de plántulas de acelga.

Tabla 7. Contenido de plomo en raíz de plántulas de acelga.

Tiempo (Días)	Plomo en la raíz de plántulas de acelga (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	1.46	1.32	1.81	4.62
4	2.05	1.71	1.98	4.01
7	2.19	1.67	1.66	2.31
11	1.65	1.67	1.51	2.76
14	1.62	1.60	1.98	3.85
17	3.03	2.74	1.47	1.85
20	1.50	1.32	2.29	2.19
26	2.26	2.34	3.34	1.50

7.5.1.2 Contenido de Cadmio

En la Figura 10 se observa la concentración de cadmio almacenado a través del tiempo en el tallo y las hojas de acelga al aplicar los tratamientos T1, T2, T3 y SC. Para los tratamientos T1, T2 y T3 la concentración de cadmio aplicada fue de 2 mg/kg de vermiculita, lo cual se refleja en la similitud del contenido de cadmio a través del tiempo en las submuestras tallo/hojas de acelga (Figura 10); de acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 8, al aplicar estos tratamientos la parte foliar almacenó hasta el día 14 alrededor de 0.11g de Cd / kg de peso seco, en los siguientes días la concentración disminuyó manteniéndose cercana a 0.04 g de Cd /kg de peso seco, en tanto que el cultivo en suelo contaminado (CS) con 10 mg de Cd/kg almacenó en la parte aérea entre 0.03 y 0.05 g de Cd/kg de peso seco.

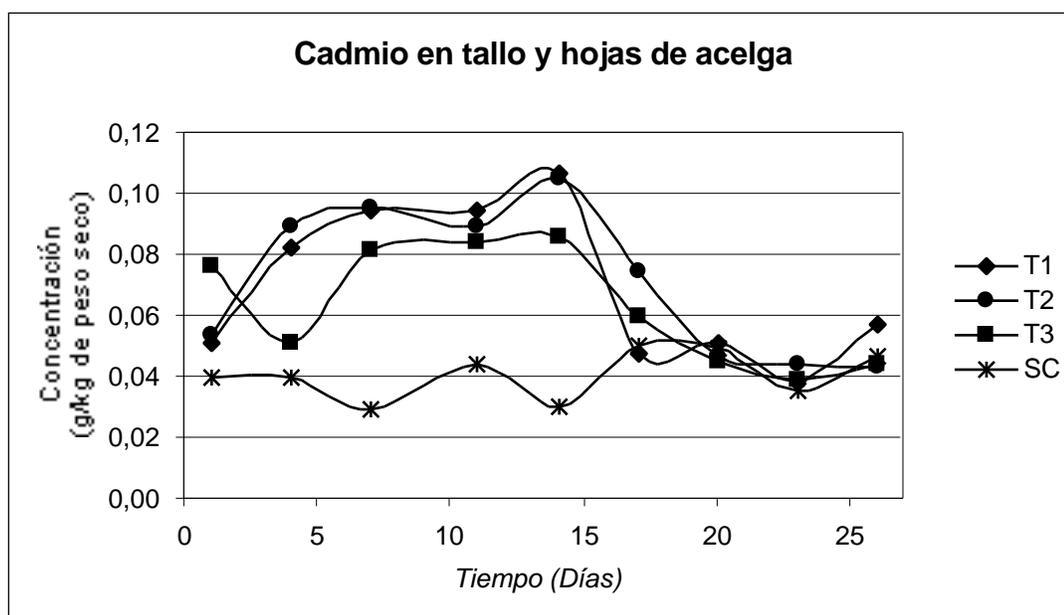


Figura 10. Contenido de cadmio en tallo y hojas de plántulas de acelga.

Tabla 8. Contenido de cadmio en tallo y hojas de plántulas de acelga.

Tiempo (Días)	Cadmio en tallo y hojas de plántulas de acelga (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.05	0.05	0.08	0.04
4	0.08	0.09	0.05	0.04
7	0.10	0.10	0.08	0.03
11	0.09	0.09	0.08	0.04
14	0.11	0.11	0.09	0.03
17	0.05	0.07	0.06	0.05
20	0.05	0.05	0.05	0.05
23	0.04	0.04	0.04	0.04
26	0.06	0.04	0.04	0.05

Por otra parte, como se muestra en la Figura 11, al aplicar los tratamientos T1, T2 y T3 las raíces de acelga acumularon entre 0.12 y 0.26 g de Cd/kg de peso seco. En la Tabla 9 se observa que en las raíces provenientes del cultivo en suelo contaminado (SC) la concentración de cadmio se mantuvo entre 0.11 y 0.30 g de Cd /kg de peso seco.

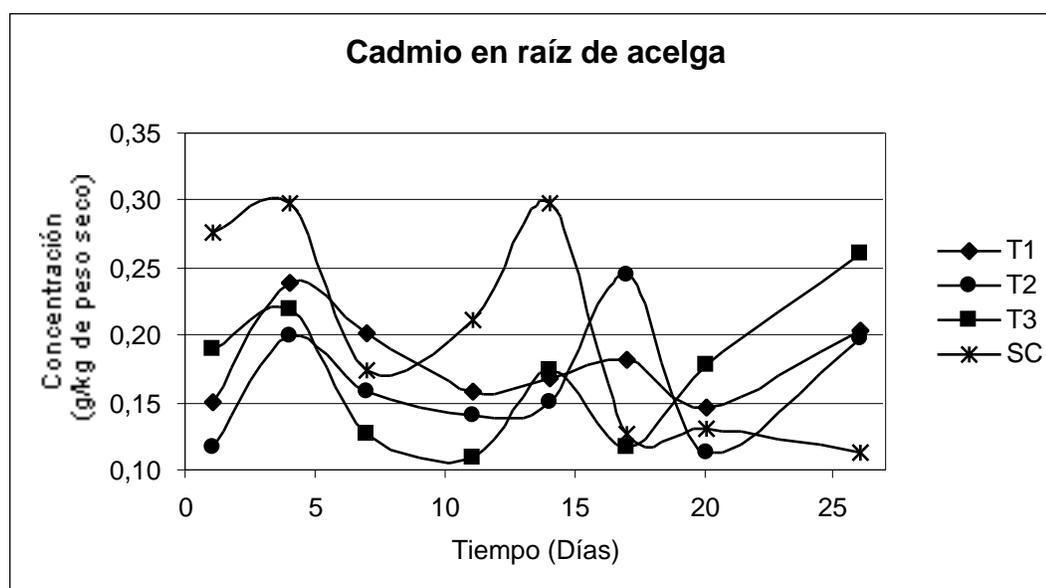


Figura 11. Contenido de cadmio en raíz de plántulas de acelga.

Tabla 9. Contenido de cadmio en raíz de plántulas de acelga.

Tiempo (Días)	Cadmio en la raíz de plántulas de acelga (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.15	0.12	0.19	0.28
4	0.24	0.20	0.22	0.30
7	0.20	0.16	0.13	0.18
11	0.16	0.14	0.11	0.21
14	0.17	0.15	0.18	0.30
17	0.18	0.24	0.12	0.13
20	0.15	0.11	0.18	0.13
26	0.20	0.20	0.26	0.11

7.5.2 FRIJOL

El estudio en plántulas de frijol se realizó el transcurso de 6 días, tomando a diario muestras de plántulas, las cuales se procesaron de acuerdo a lo señalado en materiales y métodos para así cuantificar el contenido de plomo y cadmio en las submuestras T/H y R.

7.5.2.1 Contenido de Plomo

Como resultado de los tratamientos T1, T2, T3 y SC en las plantas de frijol, la concentración almacenada por la parte aérea se mantuvo entre 0.08 y 0.22 g de Pb/kg de peso seco a lo largo de 6 días de análisis como se observa en la Figura 12; siendo este un intervalo de concentración menor al que presentan las raíces bajo los mismos tratamientos: 0.45 a 2.27 g/kg de peso seco según lo descrito en la Figura 13. De igual forma, en las Tablas 10 y 11 se indica el contenido de plomo en la parte aérea y la raíz de plántulas de frijol respectivamente.

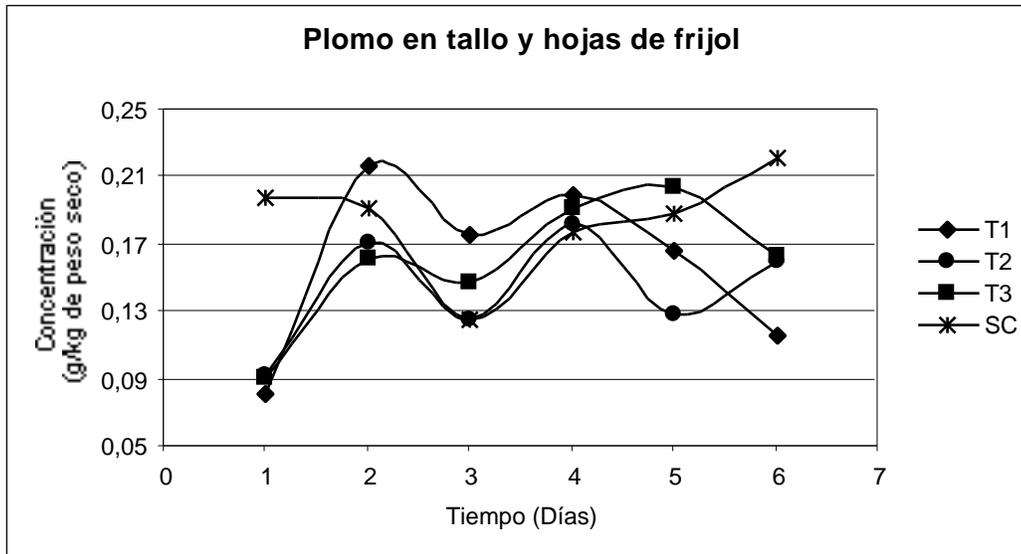


Figura 12. Contenido de plomo en tallo y hojas de plántulas de frijol.

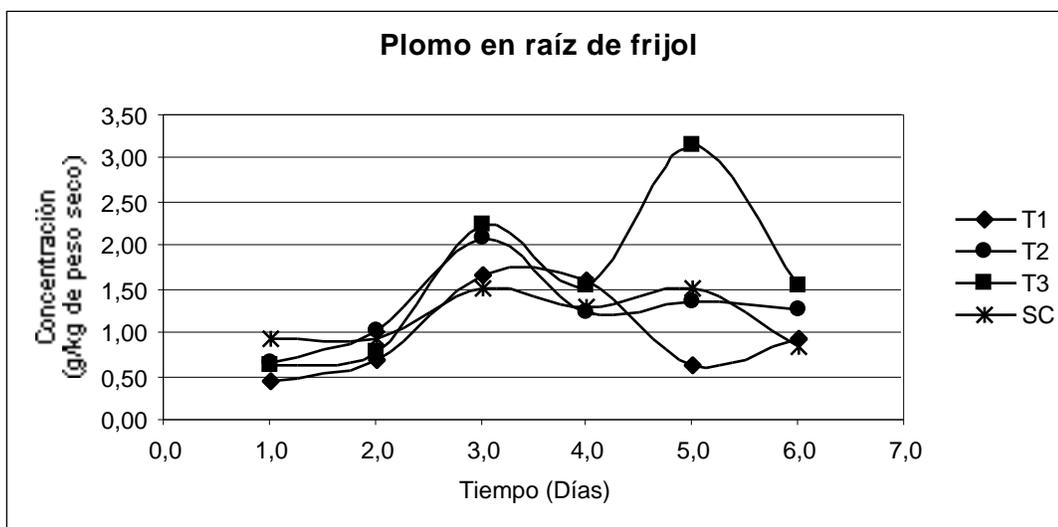


Figura 13. Contenido de plomo en raíz de plántulas de frijol.

Tabla 10. Contenido de plomo en tallo y hojas de plántulas de frijol.

Tiempo (Días)	Plomo en tallo y hojas de plántulas de frijol (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.08	0.09	0.09	0.20
2	0.22	0.17	0.16	0.19
3	0.18	0.13	0.15	0.13
4	0.20	0.18	0.19	0.18
5	0.17	0.13	0.20	0.19
6	0.12	0.16	0.16	0.22

Tabla 11. Contenido de plomo en raíz de plántulas de frijol.

Tiempo (Días)	Plomo en la raíz de plántulas de frijol (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.45	0.68	0.64	0.94
2	0.71	1.05	0.78	0.94
3	1.68	2.11	2.27	1.53
4	1.63	1.23	1.55	1.31
5	0.65	1.38	3.16	1.53
6	0.94	1.27	1.55	0.86

7.5.2.2 Contenido de Cadmio

En el cultivo de frijol con los tratamientos T1, T2 y T3 el cadmio almacenado en tallo y hojas (Figura 14) fue de 0.010 a 0.021 g de Cd/kg de peso seco, mientras que el frijol proveniente del cultivo en suelo contaminado almacenó alrededor de 0.013 g de Cd/kg de peso seco durante 6 días de crecimiento, como se muestra en la Tabla 12. Tanto en la Figura 15 como en la Tabla 13 se observa que el almacenamiento de cadmio en las raíces durante el mismo periodo fue de 0.049 a 0.018 g de Cd/kg de peso seco.

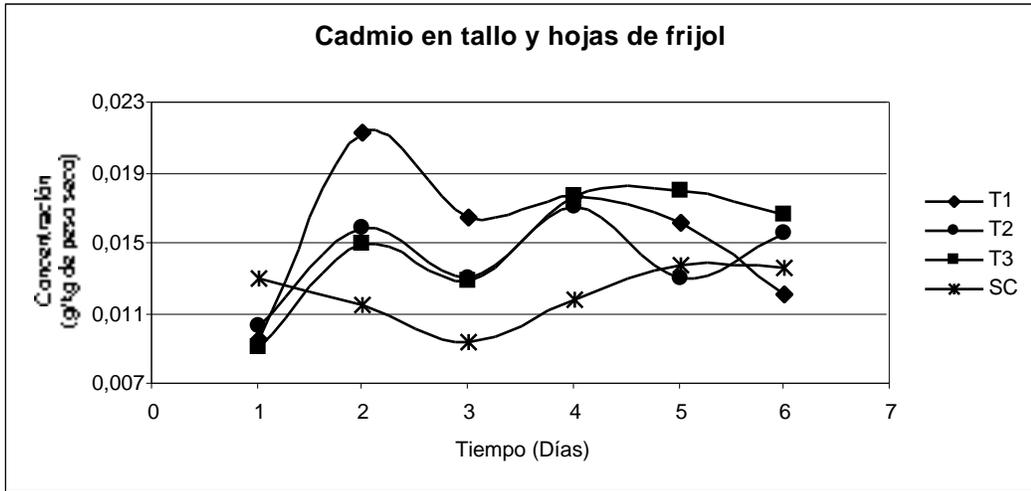


Figura 14. Contenido de cadmio en tallo y hojas de plántulas de frijol.

Tabla 12. Contenido de cadmio en tallo y hojas de plántulas de frijol.

Tiempo (Días)	Cadmio en tallo y hojas de plántulas de frijol (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.010	0.010	0.009	0.013
2	0.021	0.016	0.015	0.012
3	0.017	0.013	0.013	0.009
4	0.018	0.017	0.018	0.012
5	0.016	0.013	0.018	0.014
6	0.012	0.016	0.017	0.014

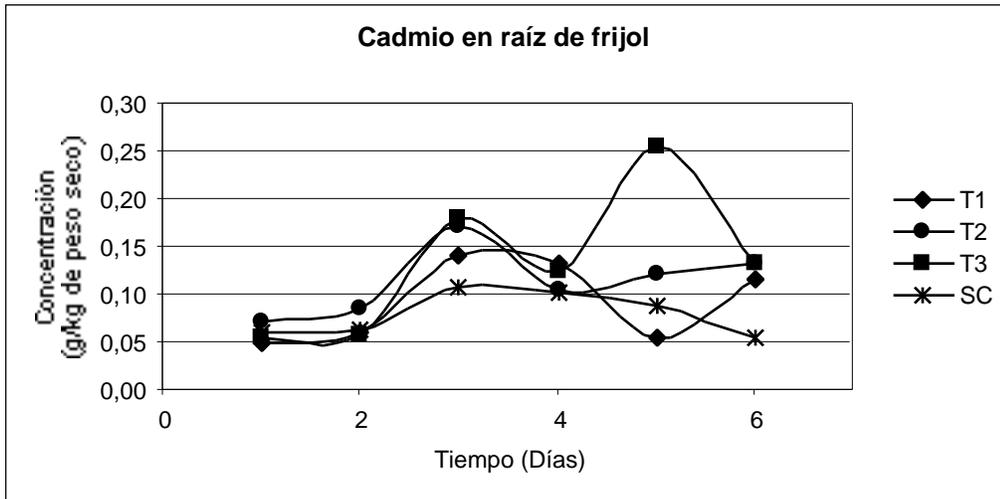


Figura 15. Contenido de cadmio en raíz de plántulas de frijol.

Tabla 13. Contenido de cadmio en raíz de plántulas de frijol.

Tiempo (Días)	Cadmio en la raíz de plántulas de frijol (g Pb/ kg de peso seco)			
	T1	T2	T3	SC
1	0.049	0.073	0.056	0.062
2	0.061	0.085	0.057	0.064
3	0.143	0.171	0.181	0.108
4	0.132	0.105	0.125	0.102
5	0.056	0.122	0.255	0.090
6	0.116	0.132	0.134	0.055

7.6 EFECTO DE PLOMO Y CADMIO SOBRE LAS PLÁNTULAS DE ACELGA Y FRIJOL

7.6.1 ACELGA

7.6.1.1 *Elongación del tallo*

La longitud del tallo y la hoja se determinó de acuerdo a lo indicado en materiales y métodos, reportando los resultados en centímetros.

En la Figura 16 se muestra la longitud promedio del tallo para las plántulas analizadas en los tratamientos T1, T2, T3, SC y CC.

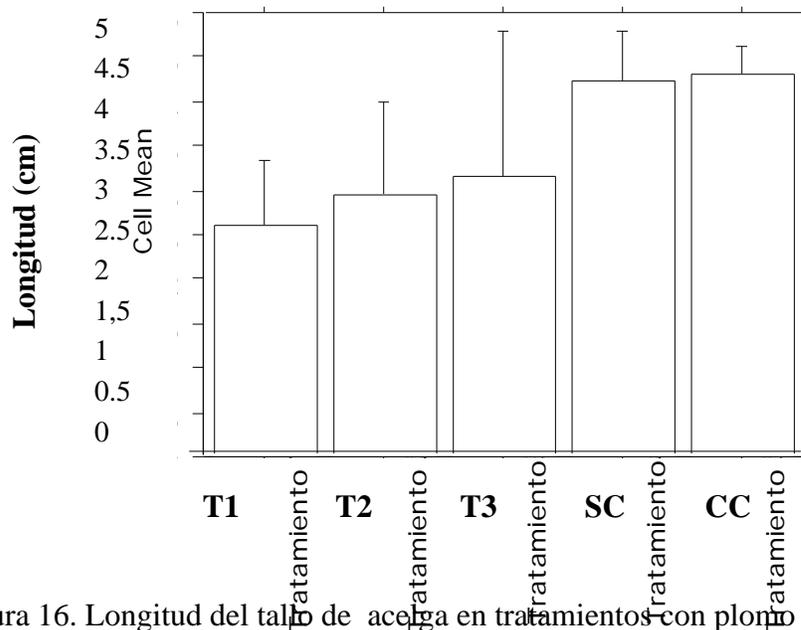


Figura 16. Longitud del tallo de acelga en tratamientos con plomo y cadmio.

Se realizó el análisis estadístico para la elongación del tallo determinado en acelga sembrada bajo condiciones de sustrato contaminado (T1, T2, T3, SC) así como en un cultivo control CC. De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 14 y se observaron diferencias significativas entre la longitud del tallo , con una confianza del 95%.

Tabla 14. ANOVA para la elongación del tallo determinada en acelga en función de los diferentes tratamientos de sustrato contaminado con plomo y cadmio.

<i>Fuente</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>S.C.</i>	<i>M.C.</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Tratamiento	4	11.982	2.996	4.951	0.0061
Residual	20	12.100	0.605		

Para saber que tratamientos difieren entre sí, se realizó la prueba Fisher's PLSD ($p < 0.05$). Los resultados se muestran en la Tabla 15, en la que se establece que entre los tratamientos T1, T2 y T3 no se observaron diferencias significativas (al 95% de confianza), sin embargo estos tratamientos fueron significativamente diferentes a los tratamientos SC y CC. También se puede observar que no existió diferencia significativa entre el tratamiento de suelo contaminado y el cultivo control.

Tabla 15. Prueba Fisher's PLSD para elongación del tallo en acelga.

	<i>Mean Diff.</i>	<i>Crit. Diff</i>	<i>P-Value</i>	
T1,T2	-0.360	1.026	0.4728	
T1,T3	-0.560	1.026	0.2684	
T1,T4	-1.620	1.026	0.0036	S
T1,T5	-1.720	1.026	0.0023	S
T2,T3	-0.200	1.026	0.6887	
T2,T4	-1.260	1.026	0.0186	S
T2,T5	-1.360	1.026	0.0120	S
T3,T4	-1.060	1.026	0.0435	S
T3,T5	-1.060	1.026	0.0287	S
T4,T5	-0.100	1.026	0.8410	

7.6.1.2 *Elongación de la hoja*

La longitud promedio de la hoja de acelga para los distintos tratamientos aplicados se describe en la Figura 17.

La Tabla 16 muestra el análisis estadístico de la longitud de la hoja de acelga en los diferentes tratamientos evaluados y se observa que existían diferencias significativas entre los tratamientos, con una confianza del 95%. De acuerdo a los resultados de la prueba Fisher's PLSD ($p < 0.05$), Tabla 17, no existió diferencia significativa entre los tratamientos T1, T2 y T3, en tanto que los tratamientos de cultivo control (CC) y suelo contaminado(SC) fueron significativamente diferentes. Resultando visiblemente afectada la elongación de las hojas por la contaminación presente en el suelo.

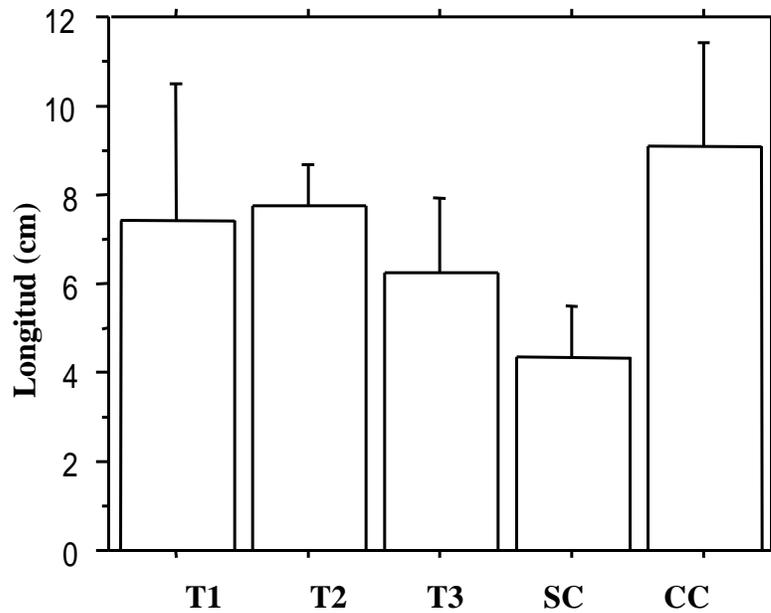


Figura 17. Longitud de la hoja acelga en tratamientos con plomo y cadmio.

Tabla 16. ANOVA para la elongación de la hoja determinada en acelga en función de los diferentes tratamientos de sustrato contaminado con plomo y cadmio.

<i>Fuente</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>S.C.</i>	<i>M.C.</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Tratamiento	4	64.122	16.030	6.100	0.0022
Residual	20	52.560	2.628		

Tabla 17. Prueba Fisher's PLSD para elongación de la hoja en acelga.

	<i>Mean Diff.</i>	<i>Crit. Diff</i>	<i>P-Value</i>	
T1,T2	-4.00	2.139	0.7006	
T1,T3	1.120	2.139	0.2876	
T1,T4	3.080	2.139	0.0070	S
T1,T5	-1.680	2.139	0.1169	
T2,T3	1.520	2.139	0.1538	
T2,T4	3.400	2.139	0.0029	S
T2,T5	-1.280	2.139	0.2263	
T3,T4	1.960	2.139	0.0704	
T3,T5	-2.800	2.139	0.0129	S
T4,T5	-4.760	2.139	0.0002	S

7.6.1.3 Análisis de clorofila

Se realizó el análisis de clorofila de acuerdo a la metodología descrita previamente para las plántulas de acelga de los tratamientos en suelo contaminado con plomo y cadmio (SC) y del cultivo control (CC).

En plántulas de acelga con el tratamiento SC la concentración de clorofila alfa disminuyó progresivamente de 63.67 a 42.84 mg/kg peso fresco, siendo este rango de concentración menor al que presentaron las hojas de acelga del cultivo control durante 26 días de estudio. En el cultivo control la concentración de clorofila alfa disminuyó durante los primeros 11 días de 104.02 a 58.5 mg/kg de peso fresco, se mantuvo relativamente constante hasta el día 20 y posteriormente la concentración aumentó hasta 97.58 mg/kg de peso fresco (ver Figura 18).

En la Figura 19 se describe el contenido de clorofila beta en hojas de acelga a lo largo del tiempo. En las hojas de acelga provenientes del tratamiento en suelo contaminado la concentración de clorofila beta disminuyó de 28.2 a 15.75 mg/kg de peso fresco, siendo este intervalo menor al observado en hojas de plántulas cultivadas como control. Para el cultivo control la concentración inicial de clorofila beta fue de 41.81 mg/kg de peso fresco, se observó un descenso gradual hasta 23.32 mg/kg de peso fresco y a partir del día 17 la concentración aumentó hasta 39.40 mg/kg de peso fresco.

En la Figura 20 se observa el contenido de clorofila total en plántulas de acelga de suelo contaminado y de cultivo control, con un comportamiento similar a los descritos anteriormente para la concentración de clorofila alfa y beta. Los resultados numéricos del contenido de clorofila alfa, beta y total se muestran en la tabla 18.

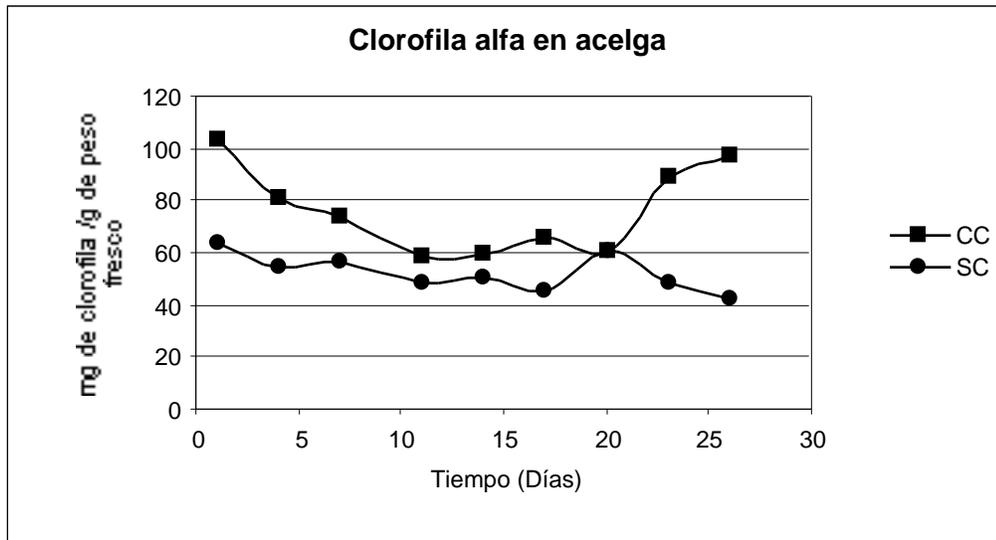


Figura 18. Clorofila alfa en plántulas de acelga en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

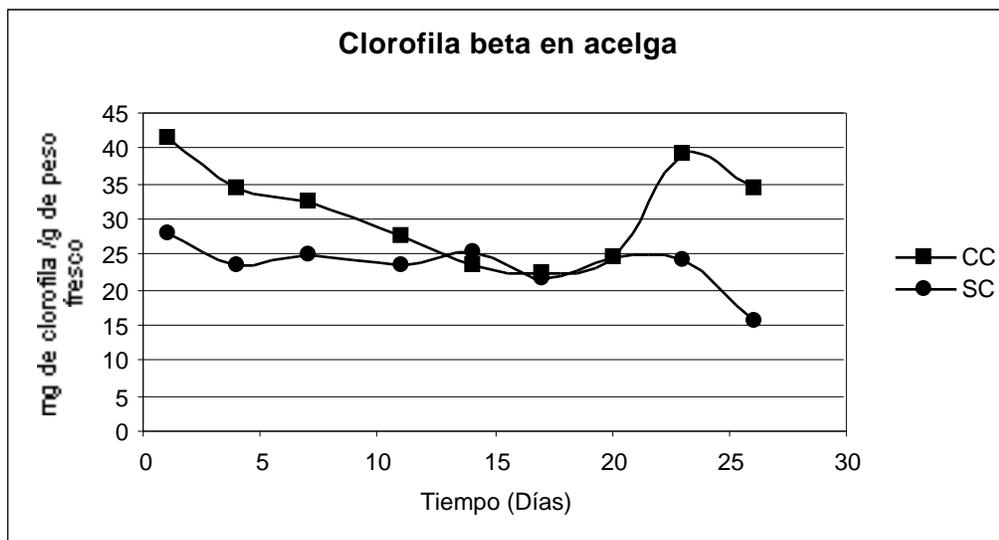


Figura 19. Clorofila beta en plántulas de acelga en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

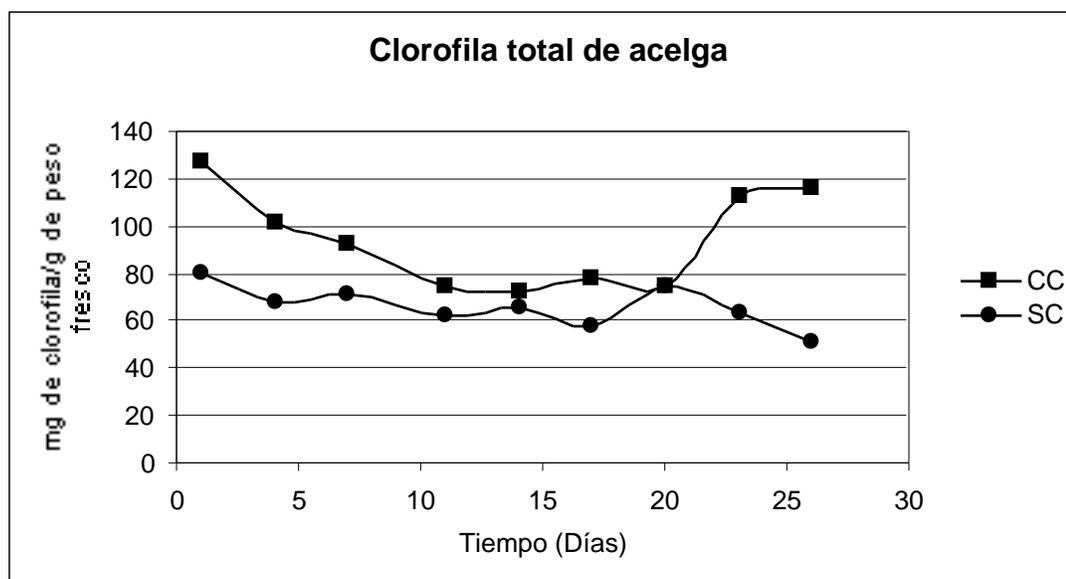


Figura 20. Clorofila total en plántulas de acelga en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

Tabla 18. Clorofila alfa, beta y total en plántulas de acelga en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

Tiempo (Días)	Clorofila en acelga (mg de clorofila / g de peso fresco)					
	Clorofila alfa		Clorofila beta		Clorofila total	
	CC	SC	CC	SC	CC	SC
1	104.02	63.67	41.81	28.20	127.75	80.21
4	81.57	54.83	34.63	23.75	101.61	68.66
7	74.28	57.21	32.58	24.96	93.33	71.78
11	58.50	48.38	27.60	23.45	75.01	62.52
14	59.93	50.77	23.50	25.50	73.14	66.30
17	66.25	45.63	22.32	21.80	78.03	58.72
20	61.08	60.97	24.68	24.64	75.11	74.99
23	89.56	48.48	39.40	24.56	112.62	63.47
26	97.58	42.84	34.44	15.75	116.14	51.47

7.6.2 FRIJOL

7.6.2.1 *Elongación de la raíz*

La Figura 21 muestra la longitud promedio de la raíz de frijol para los tratamientos T1, T2, T3, SC y CC.

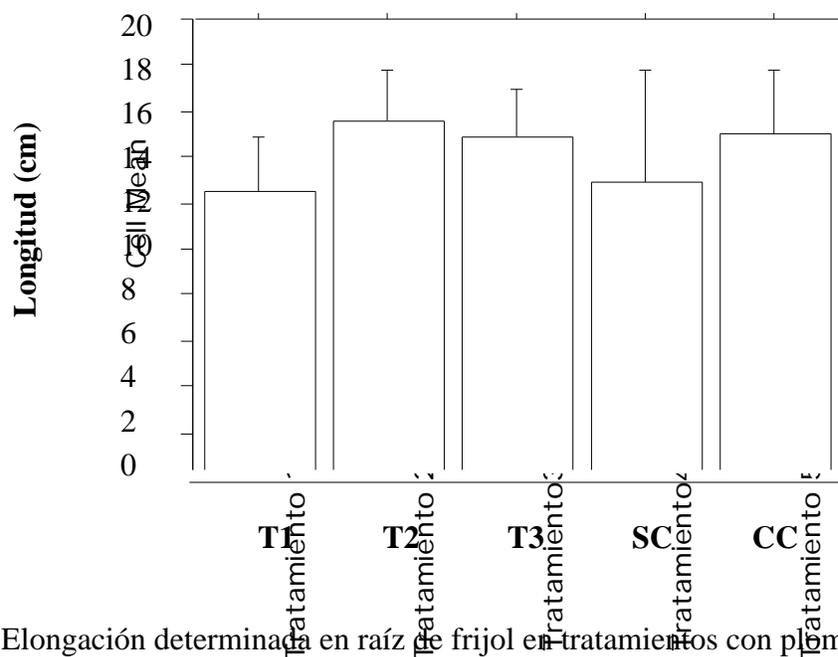


Figura 21. Elongación determinada en raíz de frijol en tratamientos con plomo y cadmio.

Entre los tratamientos se observó un rango de la longitud de la raíz que fue de 12.54 cm en el tratamiento T1 a 15.5 cm para el tratamiento T2. Sin embargo de acuerdo al análisis de varianza (Tabla 19) no existieron diferencias significativas entre los tratamientos T1, T2, T3, SC y CC (al 95% de confianza).

Tabla 19. ANOVA para la elongación de raíz determinada en frijol en función de los diferentes tratamientos de sustrato contaminado con plomo y cadmio.

<i>Fuente</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>S.C.</i>	<i>M.C.</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Tratamiento	4	36.302	9.075	1.511	0.2368
Residual	20	120.120	6.006		

7.6. 2.2 Elongación del tallo

En la Figura 22 se describe la longitud promedio del tallo de frijol en los tratamientos T1, T2, T3, SC y CC.

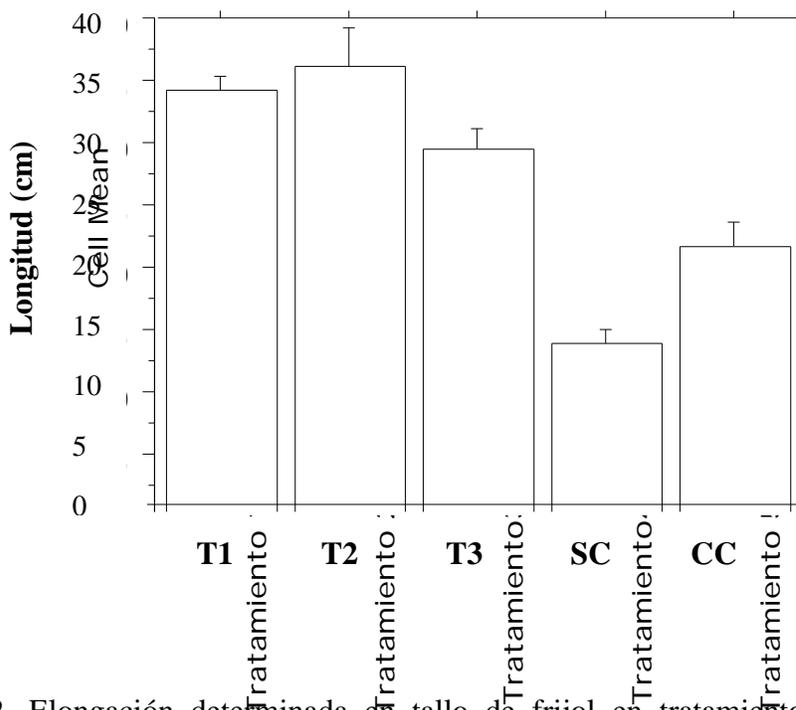


Figura 22. Elongación determinada en tallo de frijol en tratamientos con plomo y cadmio.

Se realizó un ANOVA (al 95% de confianza) para determinar si hubo diferencias entre la longitud del tallo de frijol en los distintos tratamientos, de los resultados obtenidos (Tabla 20) se determina que si existió una diferencia significativa entre estos . Para conocer cuales fueron los tratamientos diferentes significativamente, se realizó la prueba Fisher's PLSD ($p < 0.05$) y los resultados se presentan en la Tabla 21 en donde se muestra que existió diferencia significativa entre los tratamientos aplicados. La mayor longitud del tallo de frijol se presentó en el tratamiento T2 con 36.20 cm , mientras que la menor longitud se presentó en el tratamiento SC con 13.92 cm .

Tabla 20. ANOVA para la elongación del tallo determinado en frijol en función de los diferentes tratamientos de sustrato contaminado con plomo y cadmio.

<i>Fuente</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>S.C.</i>	<i>M.C.</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Tratamiento	4	1709.991	427.498	179.653	<.0001
Residual	20	47.592	2.380		

Tabla 21. Prueba Fisher's PLSD para elongación del tallo de frijol.

	<i>Mean Diff.</i>	<i>Crit. Diff</i>	<i>P-Value</i>	
T1,T2	-2.060	2.035	0.0475	S
T1,T3	4.614	2.035	0.0001	S
T1,T4	20.220	2.035	<0.0001	S
T1,T5	12.520	2.035	<0.0001	S
T2,T3	6.674	2.035	<0.0001	S
T2,T4	22.280	2.035	<0.0001	S
T2,T5	14.580	2.035	<0.0001	S
T3,T4	15.606	2.035	<0.0001	S
T3,T5	7.906	2.035	<0.0001	S
T4,T5	-7.700	2.035	<0.0001	S

7.6.2.3 Elongación de la hoja

En la Figura 23 se describe la longitud promedio de las hojas de frijol en los tratamientos T1, T2, T3, SC y CC.

Se realizó un análisis de varianza (95% de confianza) de la longitud de hoja de frijol entre los tratamientos antes mencionados y como se observa en la Tabla 22 aunque se presentó un rango de longitud de la hoja de 4.76 cm para T2 a 5.76 para CC no existió una diferencia significativa entre los tratamientos analizados.

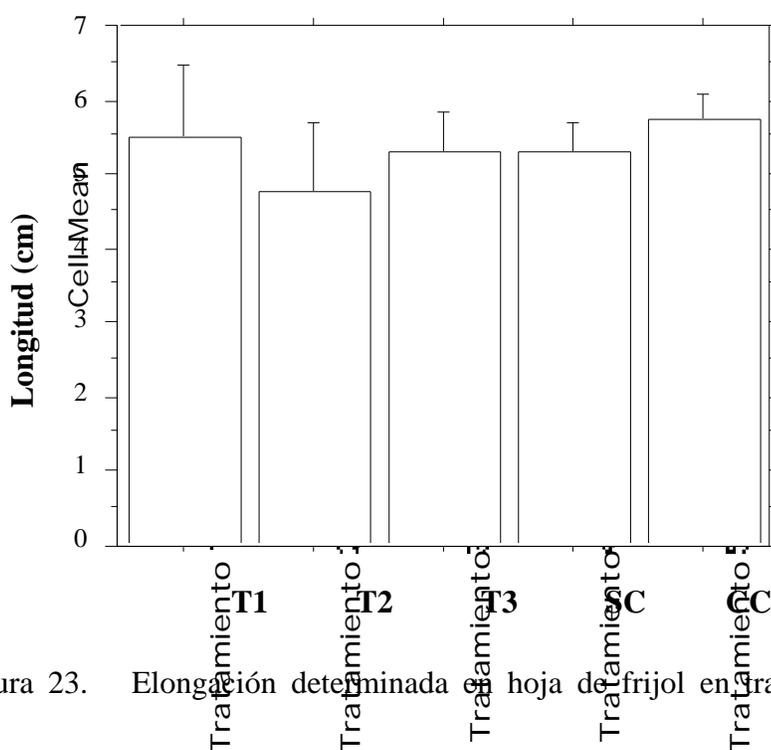


Figura 23. Elongación determinada de hoja de frijol en tratamientos con plomo y cadmio.

Tabla 22. ANOVA para la elongación de la hoja determinado en frijol en función de los diferentes tratamientos de sustrato contaminado con plomo y cadmio.

<i>Fuente</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>S.C.</i>	<i>M.C.</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Tratamiento	4	2.708	0.677	2.275	0.0971
Residual	20	5.952	0.298		

7.6.2.4 Contenido de Clorofila

En el cultivo de frijol se cuantificó el contenido de clorofila alfa (Figura 24), beta (Figura 25) y total (Figura 26); a su vez, en la Tabla 23 se muestran los resultados numéricos de tales análisis.

Al comparar la concentración de clorofila de frijol proveniente del suelo contaminado con la del cultivo control de frijol no se observan diferencias claras; aunque en ambos casos la concentración de clorofila alfa y total aumenta al cabo de seis días.

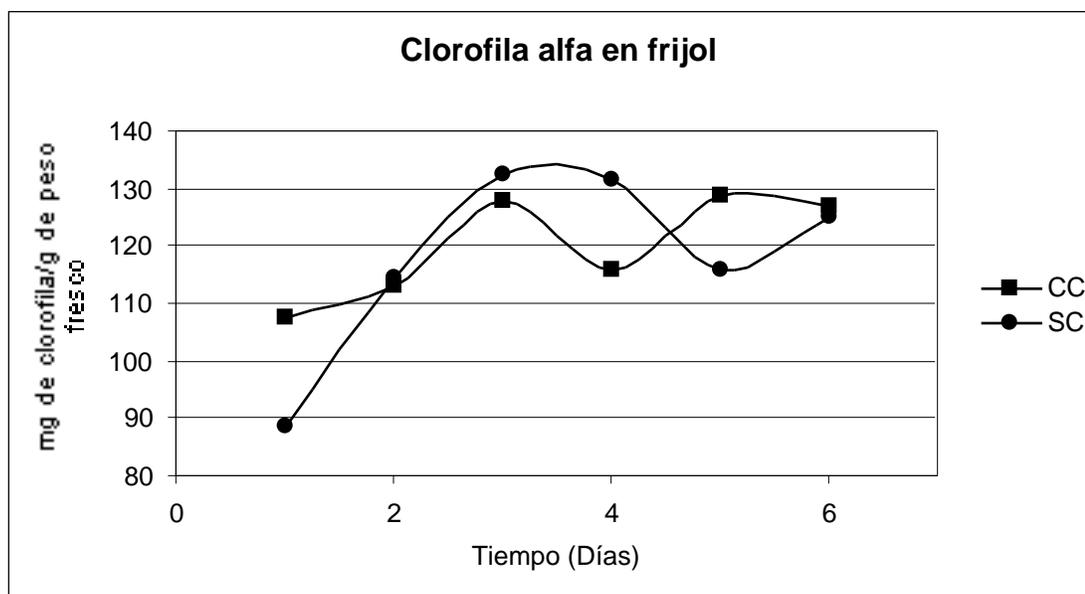


Figura 24. Clorofila alfa en plántulas de frijol en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

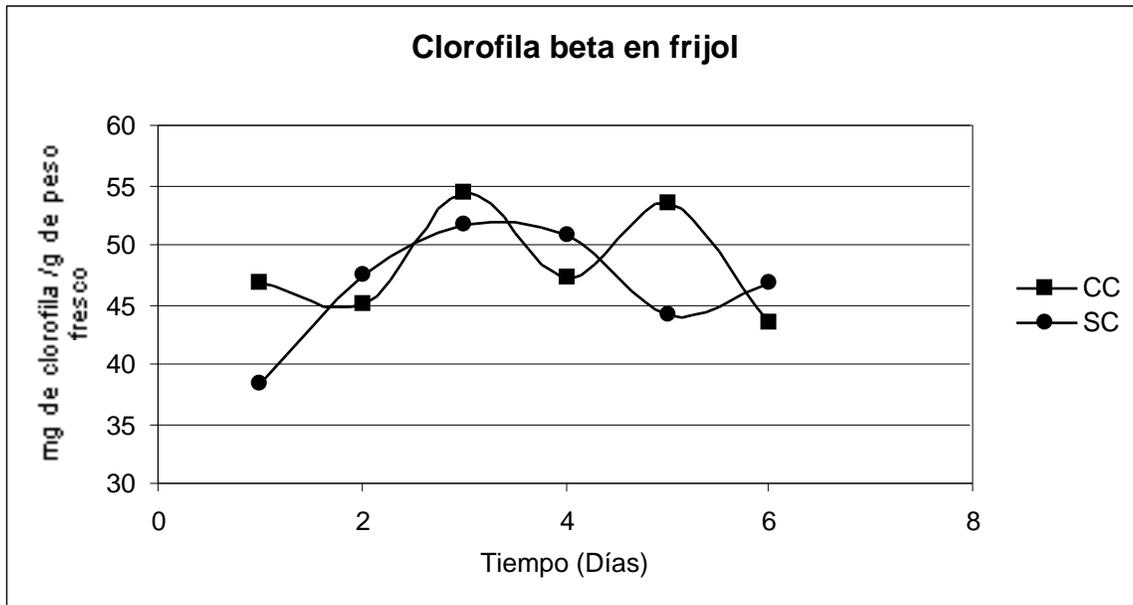


Figura 25. Clorofila beta en plántulas de frijol en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

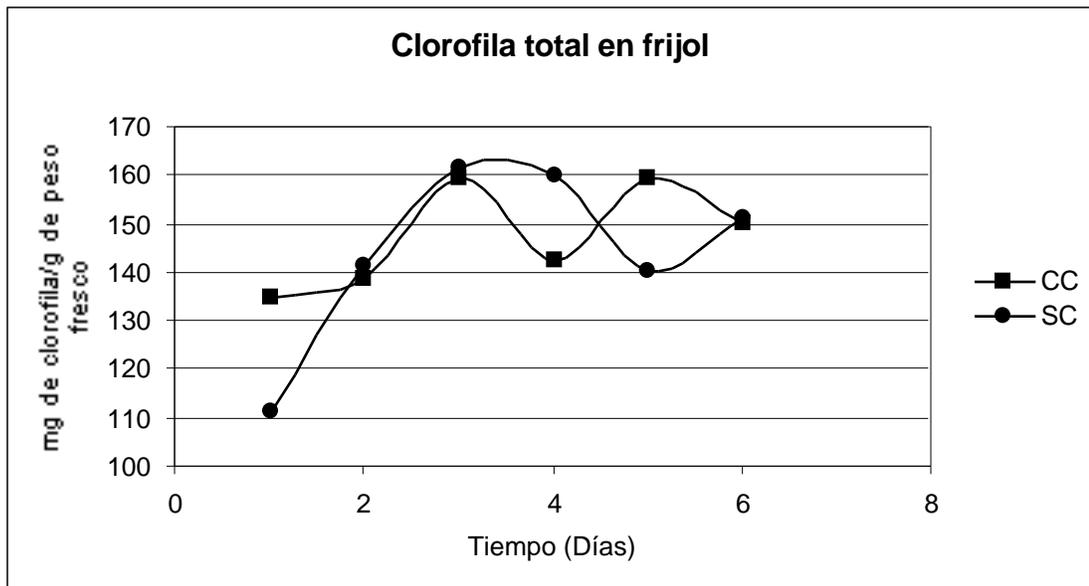


Figura 26. Clorofila total en plántulas de frijol en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

Tabla 23. Clorofila alfa, beta y total en plántulas de frijol en los tratamientos de suelo contaminado (SC) y cultivo control (CC).

Tiempo (Días)	Clorofila en frijol (mg de clorofila / g de peso fresco)					
	Clorofila alfa		Clorofila beta		Clorofila total	
	CC	SC	CC	SC	CC	SC
1	107.58	88.95	46.82	38.46	134.89	111.35
2	113.10	114.43	45.07	47.46	138.60	141.67
3	128.18	132.46	54.39	51.86	159.64	161.61
4	115.78	131.74	47.41	50.95	142.87	160.24
5	129.13	116.18	53.53	44.13	159.85	140.70
6	127.22	125.22	43.64	46.99	150.44	151.20

7.7 CUANTIFICACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN SUELO CONTAMINADO

Se cuantificó a través del tiempo el contenido de plomo y cadmio en el suelo contaminado (tratamiento SC) que fue utilizado como sustrato de enraizamiento para acelga y frijol. El suelo contaminado contenía al inicio (Día 0) 208.19 mg Pb/kg y 10.04 mg Cd/kg.

Como se observa en la Figura 27, el contenido de plomo del suelo cultivado con acelga después de 11 días fue de 94.97 mg Pb/kg y a excepción del día 23 la concentración de plomo se mantuvo prácticamente constante.

Por otra parte, en el suelo cultivado con frijol, la concentración de plomo desciende drásticamente desde el día 1, llegando al valor mas bajo el día 4 con 97.18 mg Pb/kg. En la Figura 28 se muestra el cambio de concentración de plomo en el suelo a través del tiempo de cultivo.

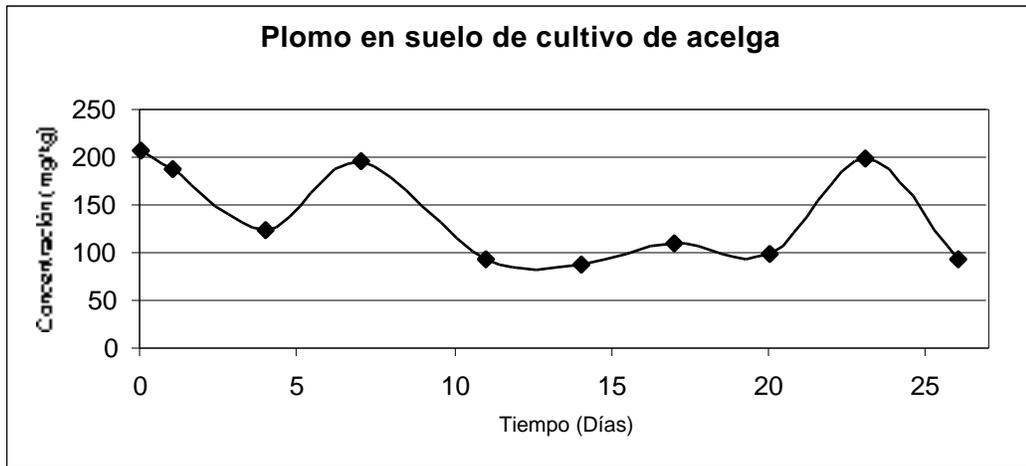


Figura 27. Contenido de plomo en suelo cultivado con acelga.

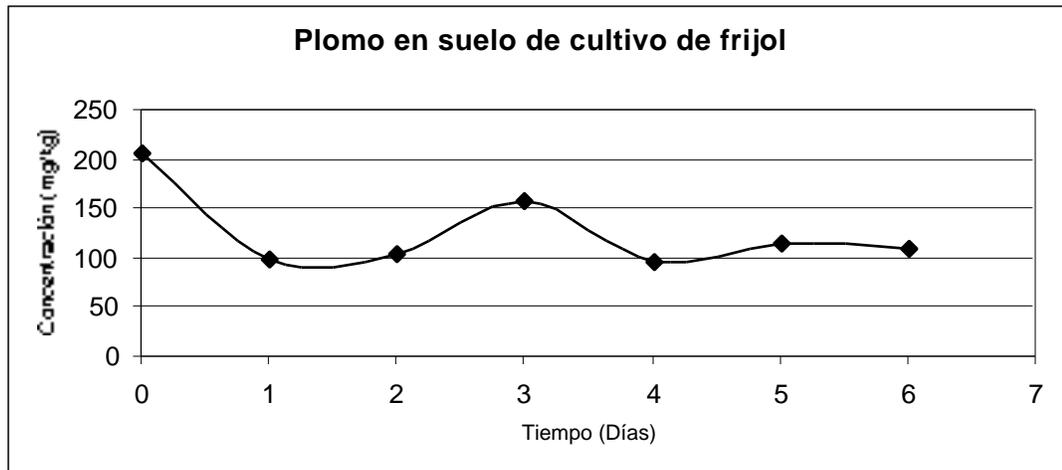


Figura 28. Contenido de plomo en suelo cultivado con frijol.

Para el caso del análisis de cadmio en el suelo contaminado, se observa en la Figura 29 que el contenido de este metal en suelo cultivado con acelga desciende a 6.46 mg/kg después de 26 días.

La concentración de cadmio en el suelo de cultivo de frijol disminuyó desde el primer día de 7.78 mg Cd/kg hasta 6.95 mg Cd/kg después de 6 días de análisis. En la Figura 30 se describe este comportamiento.

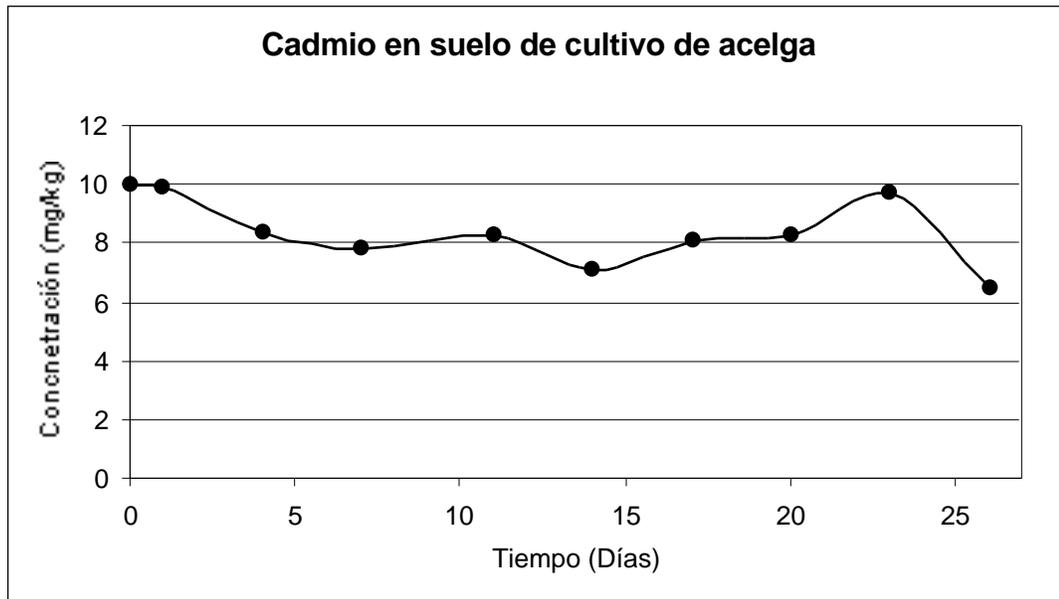


Figura 29. Contenido de cadmio en suelo cultivado con acelga.

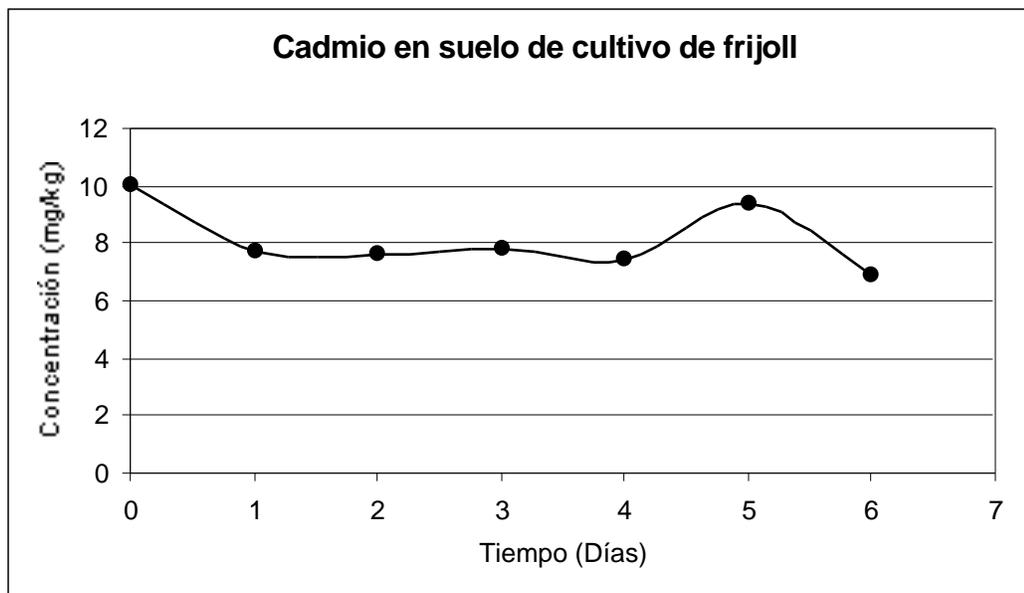


Figura 30. Contenido de cadmio en suelo cultivado con frijol.

Por otra parte, los resultados numéricos del contenido de plomo y cadmio en suelo cultivado con acelga se muestran en la Tabla 24 y en la Tabla 25 se observan los resultados del contenido de plomo y cadmio en suelo cultivado con frijol.

Tabla 24. Contenido de plomo y cadmio en suelo cultivado con acelga.

Tiempo (Días)	Suelo cultivado con acelga	
	Plomo (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)
0	208.19	10.04
1	188.08	9.88
4	123.93	8.42
7	198.26	7.87
11	94.97	8.30
14	89.85	7.14
17	111.98	8.08
20	99.80	8.28
23	198.85	9.73
26	94.26	6.46

Tabla 25. Contenido de plomo y cadmio en suelo cultivado con frijol.

Tiempo (Días)	Suelo cultivado con frijol	
	Plomo (mg/kg)	Cadmio (mg/kg)
0	208.19	10.04
1	100.50	7.78
2	105.33	7.64
3	157.39	7.89
4	97.18	7.52
5	116.00	9.40
6	111.31	6.95

Para exponer en forma más clara los resultados obtenidos, en la Tabla 26 se muestra el tiempo y el porcentaje de reducción de plomo y cadmio en el suelo de cultivo por efecto del desarrollo de plántulas de acelga y frijol.

Tabla 26. Tiempo y porcentaje de reducción de plomo y cadmio en el suelo por efecto del cultivo de acelga y frijol.

Especie	Reducción de plomo Tiempo (Días) / (%)	Reducción de cadmio Tiempo (Días) / (%)
<i>Beta vulgaris</i>	11 / 54	26/36
<i>Phaseolus vulgaris L</i>	1 / 53	6/31