

Nuevas soluciones para la restauración ambiental en zonas áridas

Resumen

Uno de los objetivos de la Fundación Cajamar consiste en el desarrollo de conocimientos que mejoren la gestión ambiental en zonas áridas. En concreto los que garanticen el mayor éxito posible a la hora de modificar bien la densidad o la distribución geográfica de ciertos elementos de la cadena ecológica cuya ausencia se asocia a un empobrecimiento del capital ambiental. La actividad práctica comenzó en diciembre del año 2008 con dos líneas principales de trabajo: 1) diseñar una enmienda en base a los componentes disponibles en el contexto almeriense y comprobar si los resultados están en línea con lo publicado sobre las enmiendas organozeolíticas; y 2) analizar cuál es la influencia que ejerce en el suelo y en la planta tanto el tipo de componente orgánico de la enmienda como el del material volcánico de las zeolitas.

Para comprender mejor los efectos positivos del compost y del tipo de zeolita utilizado, se está ensayando desde enero de 2009 en el Centro de Investigación Medio Ambiental (CIMA) de la Fundación Cajamar, un extenso programa, en el que se han usado las diez especies más representativas incluidas en las series de vegetación de la zona y que usamos en las restauraciones.

Miguel Ángel Domene Ruiz

Fundación Cajamar

José María Agüera Zurano

María Mercedes Uceda de la Maza

Dolores Buendía Guerrero

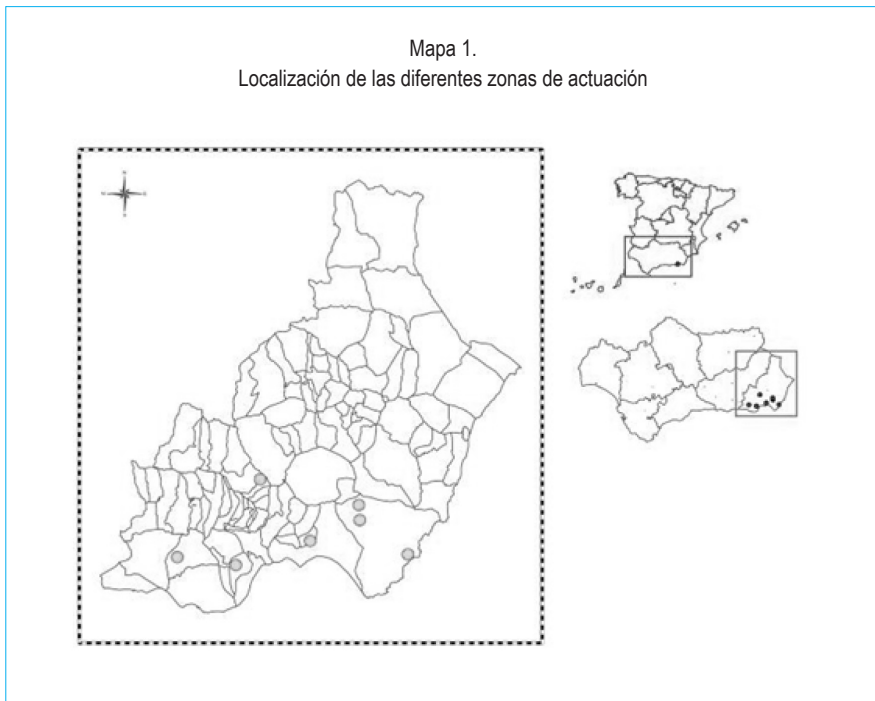
Alfonso Sevilla Portillo

1. Introducción

No es factible esperar que la naturaleza recomponga el equilibrio de aquellas zonas que sufren los efectos negativos de la erosión si no es con una intervención humana que fortalezca los eslabones más débiles, aunque ello suponga asumir el riesgo inherente a toda intervención sobre el equilibrio ecológico. Nuestro objetivo es luchar contra la percepción de que el problema es tan enorme que no hay opciones de revertir el proceso, y lo abordamos desarrollando herramientas propias de la gestión ambiental que garanticen el mayor éxito posible a la hora de acometer proyectos para modificar el estado vegetativo de un suelo relicto o un suelo degradado, y favorecer su potencial expansión ecológica hacia series estables de vegetación.

Desde el comienzo del programa en diciembre del año 2008 se han puesto en marcha dos líneas principales de trabajo: ensayar una enmienda en condiciones de campo naturales para dilucidar la existencia o no de un patrón de crecimiento asociable al uso de la misma, y analizar el efecto que puede tener tanto el uso de distintos componentes orgánicos como el compost de residuo vegetal del cultivo hortofrutícola o la gallinaza, al tiempo que dilucidar cuál es el efecto, si es que lo hay, de la aplicación de una piedra natural de origen volcánico y propiedades excelentes como intercambiador catiónico, como es la zeolita.

Mapa 1.
Localización de las diferentes zonas de actuación



La aplicación de materia orgánica como la procedente de los lodos de depuradora o de compostaje de residuo sólido urbano es una práctica que ya se ha estudiado (Brockway, 1983; White *et al.*, 1997; Aguilar *et al.*, 1999; Cortina *et al.*, 2001); lo mismo que se ha hecho con la aplicación de la zeolita para restaurar terrenos altamente contaminados en los que no era posible asentar un crecimiento vegetal de cierta importancia (Leggo *et al.*, 2001 y 2006). Lo que parecía tener alguna esperanza y no estaba probado era el conjugar esas posibles mejoras achacables a la mezcla de la zeolita con la materia orgánica cuando las condiciones de contorno son las de un suelo con baja o muy baja humedad durante muchos meses del año, y en el que por mucha mejora que se pueda generar en el suelo las plantas seguirán padeciendo un estrés hídrico muy por encima de su capacidad de supervivencia.

2. Material y métodos

a) Escala parcela

Un primer grupo de parcelas denominadas tipo A se plantaron a finales del invierno/comienzo de la primavera del 2008, mientras que las llamadas tipo B se plantaron en el otoño de ese mismo año.

Todas las parcelas de unos 2.000 m² se planificaron por duplicado: una testigo y otra enmendada de aproximadamente 1.000 m² cada una. La enmienda formada previo compostaje de compost y zeolita se aplicó en una relación del 20% al hoyo abierto para plantar los nuevos taxones, habiendo variado el uso de mordenita para las parcelas tipo A y clinoptilolita para las parcelas tipo B. En el método de plantación se combinaron islas de vegetación de unos 13 m² con individuos aislados y se utilizaron 33 especies diferentes, características de ambientes semiáridos. En la Tabla 1 podemos ver las especies utilizadas y su cantidad en las parcelas del grupo A y B.

Previo a la plantación se realizó una auditoria vegetal y una caracterización del suelo. El seguimiento se ha restringido a los taxones incorporados y no a los existentes o a los que han germinado de forma natural en cuanto a las plantas y a la dinámica del suelo siguiendo los valores de pH, CE, % N_{org}, % m.o, P_{olsen}, textura PSI, RAS, cationes de cambio Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y aniones SO₄²⁻, NO₃⁻ y Cl⁻, medida de la respiración celular.

b) Escala maceta

Se escogió el uso de un invernadero de 392 m² en el Centro de Investigación Medioambiental (CIMA) que posee la Fundación Cajamar en el término municipal de El Ejido en Almería para poder estudiar el comportamiento de diferentes enmiendas. La razón hay que buscarla en la dificultad de seguir con detalle las plantas al aire libre y a que tanto la especie como alguno de los componentes de la enmienda por un lado, y la enmienda en su conjunto por otro, parecían relacionarse sin poder identificar un patrón.

Las distintas composiciones de la enmienda consistieron en usar un solo componente, como es el caso del compost (C) y del zeopro (ZEO); mezclas de dos componentes que fueron compost más zeolita mordenita (M+C); compost más zeolita clinoptilolita (Cl+C) y gallinácea compostada con serrín y con clinoptilolita (G+C).

Tabla 1.
Parcelas del grupo A con las diferentes y número de especies plantadas

Taxones	Individuos					Total
	Dalias	Vícar	Viator	Níjar	Huebro	
<i>Anthyllis cytisoides</i>			72		12	84
<i>Atriplex halimus</i>				32		32
<i>Doricyum pentaphyllum</i>				67		65
<i>Ephedra fragilis</i>	17	17	71		16	121
<i>Genista spartioides</i>	26	14	70		17	125
<i>Helianthemus almeriense</i>				47		46
<i>Hypparrhenia hirta</i>				55		56
<i>Juniperus oxycedrus</i>	8				23	31
<i>Limonium insigne</i>	71					71
<i>Lycium intricatum</i>	14	48	31			92
<i>Lygeum spartum</i>	98					98
<i>Maytenus senegalensis</i>	13					13
<i>Olea europaea</i> var. <i>sylvestris</i>	10	13	43	60	15	140
<i>Phlomis purpurea</i>	47	39			18	103
<i>Pistacia lentiscus</i>	8	15	73	37	17	148
<i>Quercus coccifera</i>	10				16	26
<i>Retama sphaerocarpa</i>				14		80
<i>Rhamnus lycioides</i>		22	42			47
<i>Rosmarinus officinalis</i>			46	44		44
<i>Salsola genistoides</i>				15	13	30
<i>Salsola oppositifolia</i>				23		23
<i>Stipa tenacissima</i>			70		14	82
<i>Ziziphus lotus</i>			12			12
Total por localidades	79	108	594	633	161	1.569

En todas las enmiendas, además, distinguimos 4 tratamientos: T1 (5%), T2 (10%), T3 (20%) y T4 (30%) buscando optimizar no sólo el tipo de enmienda sino el mejor porcentaje que demostrase el equilibrio entre la respuesta de la planta y el uso de recursos.

Entre los días 15 y 16 de de enero de año 2009 se prepararon los maceteros con los distintos tratamientos y el día 22 se realizó la plantación de especies en los maceteros previo riego a saturación, habiendo elegido los siguientes taxones por considerarse los más habituales en cualquier tipo de ensayo en el contexto del su-

Tabla 2.
Parcelas del grupo B y número de especies plantadas

Taxones	Individuos			
	Rodalquilar	Celín	Ricaverl	Total
<i>Ceratonía siliqua</i>		6		6
<i>Chamaerpos humillis</i>	55			55
<i>Cistus albidus</i>		9		9
<i>Ephedra fragilis</i> Desf. subsp. <i>fragilis</i>	13	22	55	90
<i>Juniperus oxycedrus</i>			15	15
<i>Maytenus senegalensis</i>		5		5
<i>Olea europaea</i> L. var. <i>sylvestris</i>	45		31	76
<i>Periploca angustifolia</i>	13			13
<i>Phillyrea angustifolia</i>	19			19
<i>Phlomis purpurea</i>	70	11		81
<i>Pistacia lentiscus</i> L.	15	5	38	58
<i>Quercus coccifera</i> L.	15		17	32
<i>Rhamnus alternus</i>	14	9		23
<i>Rhamnus lycioides</i> L.	18	6	29	53
<i>Rosmarinus officinalis</i> L.		11		11
<i>Rosmarinus officinalis</i> <i>postratus</i>		10		10
<i>Stipa tenacissima</i> L.	19			19
<i>Thymus zygis</i>				0
<i>Thymus vulgaris</i>		13		13
<i>Thymus mastichina</i>		14		14
<i>Ziziphus lotus</i> (L.) Lam.		6		6
Total por localidades	296	127	185	608

reste peninsular (*Lycium intricatum*, *Olea europaea* var. *Sylvestris*, *Phlomis purpurea*, *Pistacia lentiscus*, *Rosmarinus officinalis*, *Ephedra fragilis*, *Rhamnus lycioides*, *Stipa tenacissima*, *Quercus coccifera* y *Genista umbellata*). Se utilizaron tres réplicas de cada taxón por tratamiento, dando un total de treinta macetas por tratamiento y un total de 620 macetas para el experimento en conjunto.

Las condiciones en las que se mantienen las macetas son parecidas a las del ambiente, salvo por el hecho de estar protegidas del viento. El invernadero tiene siempre las ventanas laterales y cenitales abiertas y dispone de ventiladores de extracción que renuevan el aire mecánicamente una vez que la temperatura del interior excede a la del exterior.

La lluvia y la humedad del rocío se aplican artificialmente a través de un riego con goteros autocompensantes. El aforo que se hizo a la instalación demostró una homogeneidad del 98% a la hora de repartir el agua por las macetas. Un agua se mide con caudalímetros y con la relación de la superficie de la maceta y el aforo de cada gotero permite aportar la cantidad exacta de humedad o de lluvia que hubiese caído en el exterior.

Al estar la planta confinada en una maceta con un suelo que se seca más rápidamente que en el exterior, se situaron cuatro sondas de humedad de suelo en sus correspondientes macetas-testigo que sirvieron para seguir en continuo la humedad de las macetas. Siempre que bajaba del valor que tendría el suelo en el exterior se aplicaba un micro-riego para mantener esos parámetros iguales.

Se caracterizó químicamente el suelo, las enmiendas orgánicas y las zeolitas (clinoptilolita y mordenita). Paralelamente se tomaron 220 muestras de suelo de las macetas con los diferentes tratamientos y se hizo su caracterización completa.

Las determinaciones químicas en suelos se realizaron siguiendo los Métodos Oficiales del Ministerio de Agricultura (1986), registrando el pH del suelo, la conductividad eléctrica de las muestras en extracto, la pasta saturada, la materia orgánica, el nitrógeno total, la textura, el Na, el Ca, el Mg, el K y los metales pesados como el Fe, el Cu, el Mn, el Zn, el Ni, el Pb, el Hg y el Cr, la densidad real la densidad aparente, y el contenido de humedad.

En lo que respecta a las plantas en las macetas, se les hizo un seguimiento cada 45 días de su crecimiento y de la tasa de mortandad y supervivencia, es decir, enero, febrero, abril, junio, agosto, noviembre de 2009 y enero 2010. Además se hizo un muestreo intensivo en septiembre de 2009 para conocer con exactitud la biomasa generada de las siguientes especies: olea, coscoja, stipa, lentisco. En dichas especies se contaron individualmente las hojas, ramificaciones y tallos de cada una de las plantas y de las hojas; se midió su superficie primero con planímetro, pero como vimos que daban errores no aceptables desarrollamos un método basado en escasear las imágenes y posteriormente calcular su área con ARGIS.

Durante el mes de julio se realizó una campaña intensiva para determinar la respiración celular del suelo en los diferentes tratamientos; los datos de respiración del suelo se midieron mediante un analizador infrarrojo que mide la concentración de CO₂ en una cámara portátil que se coloca sobre un anillo insertado previamente en la superficie del suelo (Environmental Gas Monitor, PP Systems, UK).

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de sustratos iniciales y de tratamientos

La tierra utilizada en el ensayo de las macetas tiene bajo contenido en materia orgánica con un promedio de 0,5%, que, asociado al contenido medio en carbonatos, será todavía menos efectivo, lo que requiere un aporte extra en forma de materia orgánica. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo también es baja 4,61 meq/100g, lo que indica que es un suelo poco fértil y el complejo de cambio se encuentra equilibrado, pero el reservorio de nutrientes para el desarrollo de las plantas es bastante escaso. El pH de 8,45 además advierte de las posibles inmovilizaciones de nutrientes. El fósforo disponible también es bajo, aunque está en el intervalo inferior de aceptación. En cuanto a valores de la relación de adsorción de sodio (RAS) con 2,81, tenemos suelo sin problema en aporte de sodio a la disolución del suelo y los cloruros con una concentración de 5.06 meq/l también son bajos.

Las zeolitas utilizadas fueron mordenita y clinoptilolita. La duplicidad viene originada por el hecho de que todos los ensayos referenciados en la literatura sobre el uso de zeolitas en el crecimiento de plantas usaban clinoptilolita (Minato, 1968; Allen *et al.*, 1995; Ming *et al.*, 2000; Perrin *et al.*, 1998). Por otro lado, Nijar, en la provincia de Almería, cuenta con el único yacimiento conocido de zeolita en la península, pero es de mordenita. El hecho de tener la materia orgánica como el compost y la mineral, aunque sea de otra composición que la tradicional, llevó a incluir los dos minerales como parte diferenciada de los ensayos.

Un elemento considerado *a priori* como posible fuente de problemas de la zeolita mordenita es la gran cantidad de Na⁺ 210.49 (mg/Kg) y Cl⁻ (289.98mg/Kg) que aporta a la disolución del suelo. En estudios realizados en el laboratorio se comprobó que es posible el rápido lavado de esas sales sin que la respuesta de la zeolita en sus interacciones con el suelo se viese afectada.

En la composición química elemental no difieren mucho, excepto en el porcentaje de Na₂O, que es mucho mayor en la mordenita; este porcentaje hará que se libere sodio a medida que se degrade el mineral en el que está englobado la zeolita, pero los aportes no serán tan significativos como los que se producen con el uso inicial de la misma sin ningún tipo de lavado. La composición mineral detecta la presencia de montmorillonita 3,5% en la zeolita clinoptilolita y de esmectita 7,5% en la mordenita. La CIC mayor la presenta la zeolita clinoptilolita con 170 cmol/Kg, no diferenciándose significativamente de mordenita 157,5 cmol/Kg.

En el ensayo se incluyó otra variedad de zeolita que, a diferencia de las anteriores, es un mineral que se ha cargado artificialmente con cationes de nitrógeno y potasio, y se le ha añadido un mineral fosfórico soluble que en su conjunto simula un dispensador de nutrientes controlado y que se ha probado con éxito de forma generalizada en los Estados Unidos, aunque en todo caso en ensayos en los que las plantas siempre se regaban según sus necesidades.

Entre las características del zeopro, la más destacable es la ausencia completa de materia orgánica, presentando una alta CIC de 190 cmol/Kg, que es un valor superior a las otras zeolitas, lo cual es lógico pues ésta se encuentra cargada.

La caracterización de la parte orgánica resulta ser de especial interés. El compost utilizado es el que se produce de forma industrial en las plantas de tratamiento de residuos del cultivo bajo invernadero en la zona productiva de Almería.

Hay que entender que las dos plantas de gestión de residuos acogen los restos de casi treinta mil hectáreas de invernadero; y que hay épocas en que cualquiera de estas instalaciones recibe más de doscientos camiones diarios, siendo limitadas las posibilidades de controlar la humedad, el oxígeno, la temperatura y el tiempo de maduración durante todo el tiempo de compostaje. El compost industrial disponible tiene las carencias propias de todo proceso industrial, y resultaba de vital importancia comprobar la viabilidad de este producto para los fines de la restauración.

La conductividad eléctrica puede evaluar la concentración de sales solubles; C1 y C2 tienen valores altos que exigen precaución a la hora de realizar enmiendas y no superar el 30% volumétrico para evitar problemas de fitotoxicidad con algunas especies. En cuanto al contenido de materia orgánica C1 con 17,08% está por debajo del límite exigido del 25% (BOE 131/1998), aunque el 40% de las réplicas sí estaban por encima del mínimo exigible. El C1, con 8,26, es el que tiene una relación carbono nitrógeno (C/N) más alta e idónea, y el C2, al ser gallinácea muy rica en urea, provoca relaciones bajas de C/N (5,7) ya que se produce pérdida de NH_3 (Morisaki, 1989). El contenido de nitrógeno osciló entre C1 1,48% y 1,43% del C2, en cualquier caso por encima del límite exigido del 1% (BOE 131/1998).

El fósforo es un elemento esencial, especialmente en el compostaje (Brown *et al.*, 1998). Los valores varían desde 3,44 g.Kg⁻¹ (C1) a 1,87 g.Kg⁻¹ (C2), que es una concentración mucho mayor que en la mayoría de suelos agrícolas 0,2-2 g.Kg⁻¹ (Tisdale y Nelson, 1996), por lo tanto la aplicación de estos compost aumenta el fósforo disponible para las plantas.

Tabla 3.
Caracterización química de los compost utilizados: C1 (compost Albaida) (N=10),
C2 (gallinácea) (N=10)

	C1	C2
Humedad (%)	17,93 ± 1,51	44,08 ± 4,7
pH (ext. saturado)	7,48 ± 1,44	7,82 ± 1,25
EC (1:5)(dS/m)	17,77 ± 2,81	19,08 ± 2,81
m.o (%)	17,08 ± 7,48	40 ± 5,25
C/N	8,26 ± 2,49	5,7 ± 2,1
Extr. Húm. To(%)	9,41 ± 2,48	2,69 ± 1,23
Á. Húmicos (%)	3,53 ± 3,13	3,15 ± 0,63
Á. Fúlvicos (%)	-	-
N (%)	1,48 ± 1,02	1,23 ± 0,75
Ca (%)	7,01 ± 1,12	7,8 ± 1,2
Mg (%)	1,26 ± 0,28	1,29 ± 0,12
P ₂ O ₅ (%)	0,79 ± 0,02	0,43 ± 0,15
K ₂ O (%)	1,22 ± 0,55	1,55 ± 0,50
Na (%)	0,87 ± 0,11	0,26 ± 0,05
Fe (ppm)	810	1.235
Cu (ppm)	35	80
Mn (ppm)	415	300
Zn (ppm)	345	130
Hg (ppm)	0,2 ± 0,1	-
Pb (ppm)	20,7 ± 5,6	14,2 ± 6,3
Cr (ppm)	7,4 ± 6,5	-
Cd (ppm)	0,5 ± 0,26	-

Nota: Los valores son promedios ± 1 desviación estándar. Celdas con -, no se efectuó la determinación. Todos los datos se tomaron sobre materia seca, excepto el parámetro humedad, que se ha hecho sobre el peso húmedo total.

La concentración de potasio varía desde 10,12 g K.Kg⁻¹ en C1 hasta 12,86 g K.Kg⁻¹ en C2, siendo una fuente alternativa de metal para los cultivos, al igual que ocurre con el calcio (70,1-78 g Ca.Kg⁻¹) y con el magnesio (12,6-12,9 g Mg.KKg⁻¹). En cuanto a la concentración de metales pesados, siempre referida a los valores promedio, se hallan valores muy por debajo de la normativa exigible a los abonos orgánicos, como era de esperar, al ser residuos vegetales la fuente de la misma: Cd (0,5 ppm); Cu (35 en C2 y 80 ppm en C3); Hg (0,2 ppm); Pb (20,7 en C2 y 14,3 en C3); Cr (7,4 ppm en C2); y Zn (345 en C2 y 130 ppm en C3).

3.2. Caracterización del suelo de las parcelas

En todas las parcelas el patrón de comportamiento ha sido muy similar, aunque en algunos casos se dispusiera de suelos muy pobres y con elevado grado de salinidad, como es el caso de Nijar y Viator, y luego otros más fértiles, pero con muy poco suelo, como es el caso de Vícar.

Se ha comprobado que la adición de la enmienda ha modificado de forma sistemática una serie de parámetros que se pueden sintetizar como sigue:

1. Se eleva el contenido de materia orgánica desde un contenido deficiente hasta un valor bueno, incrementándose un 68% como promedio en las parcelas con respecto al control.
2. El contenido en nitrógeno orgánico se eleva a contenidos significativos ($0,16\% \pm 0,04$) dando una relación C/N de 10 a 15,6.
3. El fósforo se eleva desde 30 hasta 100 ppm como promedio de las parcelas, valor en intervalo óptimo.
4. Aumenta un promedio de 53% la CIC del suelo, lo que supone una mejora considerable en el reservorio de nutrientes.
5. Aumenta de forma significativa el reservorio de potasio con promedio de 2,7 meq/100g, influenciado por la interacción zeolita-compost.
6. Han disminuido las concentraciones de Na y Cl tóxicas de 35,52 y 46,32 hasta 11,83 y 3,56, más tolerantes y menos perjudiciales.
7. El potasio disponible en la solución del suelo aumenta, favorecido por la zeolita.
8. La conductividad eléctrica de suelos salinos como los de Viator y Nijar disminuye, y en los suelos con CE muy baja aumenta.
9. Mejora la capacidad de retención de humedad y por tanto el agua útil.

Tabla 4. Evolución en la calidad del suelo en las parcelas de Viator, Níjar, Huebro y Vícar, transcurrido el primer año desde el inicio del experimento

	Viator inicio	Viator 12 meses	Níjar inicio	Níjar 12 meses	Huebro inicio	Huebro 12 meses	Vícar inicio	Vícar 12 meses
Materia orgánica (%)	0,27	2,35	0,27	1,57	0,37	1,41	2,65	3,79
Nitrogeno orgánico (%)	0,095	0,15	0,023	0,15	0,011	0,12	0,1	0,22
Nitrógeno nítrico (ppm)	30,52	24,55	15,26	168,47	0,12	1,05	3,48	24,57
Fósforo (OLSEN) (ppm)	59,42	150,74	26,86	91,54	25,69	102,49	34,45	82,81
Cationes de cambio								
Sodio (meq/100 g)	0,82	4,12	0,11	1,31	0,17	1,61	0,94	1,20
Potasio (meq/100 g)	0,44	3,43	0,39	2,21	0,26	1,74	0,88	3,43
Calcio (meq/100 g)	6,93	10,66	4,18	9,50	4,08	8,37	13,76	18,41
Magnesio (meq/100 g)	1,47	2,55	0,98	2,47	1,19	2,68	2,29	3,33
CIC (meq/100 g)	9,66	20,75	5,67	15,48	5,70	14,39	17,87	26,37
pH	8,15	8,54	8,04	8,15	8,39	8,46	8,42	8,28
Conductividad (25 °C)	7,04	1,69	18,61	10,21	0,79	1,19	0,80	2,08
SAR	8,29	6,97	15,89	5,49	2,65	5,90	0,96	1,59
PSI	11,08	9,11	22,41	6,91	2,67	7,52	0,16	1,10
Cationes solubles								
Sodio (meq/l)	35,52	11,83	111,80	34,83	3,98	7,87	1,70	4,56
Potasio (meq/l)	0,36	1,53	3,48	9,59	0,23	1,22	0,12	0,88
Calcio (meq/l)	25,70	3,09	49,75	41,50	2,59	1,65	4,71	12,35
Magnesio (meq/l)	10,99	2,67	49,20	38,95	1,93	1,91	1,52	4,02
Cloruros (meq/l)	46,32	3,56	138,32	42,31	3,56	4,06	2,56	8,06
Sulfatos (meq/l)	10,23	8,58	56,11	46,21	0,87	4,58	1,54	7,05
Nitratos (meq/l)	6,97	0,39	3,26	33,63	0,03	0,18	0,47	3,34

3.3. Caracterización de los tratamientos de macetas

Se cogieron tres replicas por especie, es decir, teníamos un total de 30 muestras por tratamiento, que hacían un total de 210 muestras que posteriormente se promediaban a una muestra con su desviación estándar. Para estudiar de forma global el comportamiento por tratamiento y su comportamiento en las diferentes proporciones, se analizó la evolución de cada parámetro en función de la proporción.

Tabla 5.

Valores promedio de 10 réplicas por tratamiento del pH (1:2,5) ± desviación estándar

	pH			
	5%	10%	20%	30%
Compost	8,57 ± 0,04	8,47 ± 0,06	8,28 ± 0,06	8,15 ± 0,06
Mordenita + compost	8,55 ± 0,07	8,41 ± 0,09	8,26 ± 0,11	8,15 ± 0,06
Clinoptilolita + compost	8,54 ± 0,07	8,43 ± 0,07	8,19 ± 0,13	8,06 ± 0,04
Clinoptilolita + gallinaza	8,70 ± 0,06	8,44 ± 0,03	8,18 ± 0,13	8,08 ± 0,09
Zeopro	8,71 ± 0,08	8,67 ± 0,09	8,54 ± 0,06	8,46 ± 0,05

Respecto al pH los tratamientos de compost, mordenita más compost y clinoptilolita más compost, no difieren significativamente, y la enmienda a base de clinoptilolita más compost es la que disminuye el pH a valores mejores de 8,06. En estas disminuciones conseguiremos, dentro de la limitación del pH, incrementos en la movilización de macronutrientes y micronutrientes, que a valores tan alcalinos están seriamente inmovilizados.

En los pH en los que nos movemos es interesante resaltar las siguientes consideraciones:

- Se generará una elevada solubilidad de las sales amónicas y nítricas, es decir, que la interacción compost–zeolita puede beneficiar las pérdidas por lixiviación que pueden producirse.
- La solubilidad del fósforo se verá muy reducida ya que se encontrará en forma de fosfato de calcio insolubilizado, pero por encima del 8,5 de pH el exceso de sales sódicas puede contribuir a su solubilización.
- La solubilidad de sales de potasio y azufre también serán altas en los intervalos de pH en los que nos movemos.
- El Ca y el Mg son más asimilables a pH elevados.
- El hierro, manganeso, cobre y cinc estarán muy poco disponibles, puede conllevar un efecto muy beneficioso del aporte de materia orgánica.

En lo que respecta a los microorganismos, está suficientemente reconocido que las bacterias y actinomicetos actúan mejor en suelos con pH intermedios o altos.

Tabla 6.

Valores promedio de 10 réplicas por tratamiento de la CE (1:2,5) \pm desviación estándar

	CE (dS/m)			
	5%	10%	20%	30%
Compost	0,84 \pm 0,07	1,32 \pm 0,25	2,27 \pm 0,61	4,10 \pm 0,46
Mordenita + compost	1,00 \pm 0,16	1,76 \pm 0,36	2,67 \pm 0,29	3,64 \pm 0,47
Clinoptilolita + compost	0,94 \pm 0,12	1,10 \pm 0,14	2,34 \pm 0,24	3,17 \pm 0,33
Clinoptilolita + gallinaza	0,44 \pm 0,05	0,69 \pm 0,06	1,07 \pm 0,15	1,15 \pm 0,14
Zeopro	0,43 \pm 0,05	0,36 \pm 0,05	0,45 \pm 0,07	0,54 \pm 0,09

Los datos de conductividad son relevantes para gestionar la enmienda. El compost se ajusta a una curva exponencial con un alto coeficiente de determinación $r^2 = 0,9807$, y a partir de enmiendas al 20% empezaremos a tener problemas en la salinidad del suelo, ya que se alcanzarán potenciales osmóticos altos. El comportamiento de la mezcla mordenita más compost es todavía peor, pues de principio, e incluso al 10%, mantiene niveles de salinidad en el suelo más altas que el compost, pero su comportamiento lineal con r^2 de 0,9943 indica que la salinidad a partir de un 25% no será tan negativa como lo es en el compost.

El comportamiento exponencial de la clinoptilolita más compost da un margen mucho mayor en el aumento de porcentaje de enmienda inicial sin que aumentemos mucho el potencial osmótico de la solución del suelo debido a la salinidad; de todas formas no conviene utilizar enmiendas inicialmente por encima del 20%. Sin embargo, el tratamiento de clinoptilolita más gallinaza mantiene un aumento lineal que no supone incrementos significativos en la salinidad del suelo, pudiendo empezar con enmiendas del 30% sin ningún problema; su crecimiento es lineal con un buen coeficiente de determinación $r^2 = 0,9154$. El zeopro tampoco supone ningún incremento, y su comportamiento es polinómico de grado 2 con $r^2 = 0,8864$.

En la Tabla 7 vemos un comportamiento muy significativo. En primer lugar, la homogeneidad de las mezclas a la hora de preparar las enmiendas, ya que se produce un aumento proporcional al porcentaje de enmienda presente. Lo que sí parece claro es que, aunque hay un alto contenido en carbonato cálcico, los contenidos en materia orgánica que dan los tratamientos al 30%, excepto el del zeopro que sabemos que es una enmienda mineral, son valores muy altos. Sin embargo, *a priori*, los tratamientos al 10% no producen incrementos significativos de materia orgánica en el sustrato. Y los tratamientos al 20% son los que tienen un contenido de materia orgánica alto pero más acorde a las necesidades debido al contenido en

carbonatos y a la textura. Llama la atención que la gallinácea tenga un contenido de materia orgánica fácilmente oxidable menor que el resto de homólogos; la hipótesis es que más que viruta de serrín lleva trocitos de madera difícilmente descomponibles en el suelo con este método de materia orgánica, pero hemos constatado que la materia orgánica determinada por combustión sí tiene niveles muy parecidos al resto de enmiendas con sus mismas proporciones con respecto al sustrato. Evidentemente la enmienda únicamente orgánica a base de compost es la que presenta valores más altos en las diferentes proporciones.

Los contenidos de materia orgánica fácilmente oxidable en las proporciones del 20 y 30% ya empiezan a presentar valores muy buenos, y el tratamiento de compost y los organo-zeolíticos se comportan significativamente mejor que el de gallinácea y la zeolita.

Tabla 7.

Valores promedio de 10 réplicas por tratamiento del porcentaje materia orgánica ± desviación estándar

	% mat. org.			
	5%	10%	20%	30%
Compost	1,72 ± 0,10	2,60 ± 0,47	4,98 ± 0,61	6,58 ± 0,68
Mordenita + compost	1,86 ± 0,60	2,41 ± 0,23	4,06 ± 0,76	4,76 ± 1,81
Clinoptilolita + compost	1,83 ± 0,29	2,26 ± 0,48	4,18 ± 0,65	5,52 ± 0,05
Clinoptilolita + gallinaza	1,16 ± 0,17	1,62 ± 0,34	3,18 ± 0,23	3,09 ± 0,29
Zeopro	1,01 ± 0,13	0,91 ± 0,11	1,06 ± 0,30	0,69 ± 0,08

Tabla 8.

Valores promedio de 10 réplicas por tratamiento del contenido de fósforo ± desviación estándar

	P (ppm)			
	5%	10%	20%	30%
Compost	22,37 ± 1,83	36,04 ± 3,35	63,5 ± 3,34	87,74 ± 1,89
Mordenita + compost	15,3 ± 1,71	21,14 ± 1,50	40,93 ± 6,39	61,02 ± 5,80
Clinoptilolita + compost	17,68 ± 0,05	36,83 ± 16,87	43,08 ± 20,20	87,02 ± 6,39
Clinoptilolita + gallinaza	21,58 ± 2,14	39,12 ± 2,25	90,18 ± 0,56	103,09 ± 7,53
Zeopro	7,64 ± 3,40	6,70 ± 0,23	5,84 ± 0,52	0,42 ± 0,08

Es de resaltar que el control y los diferentes tratamientos zeopro están un poco bajos; los tratamientos al 5% y 10% están normales, incluso bajos; y los del 20% y 30% están altos o muy altos. De todas formas eso no es ningún *handicap* pues recordemos que en las condiciones de nuestro sustrato mucho de este fósforo se va a insolubilizar.

La enmienda que más fósforo libera al medio es el tratamiento de clinoptilolita más gallinácea, y después el del compost. Con este tipo de materia orgánica podemos tratar sólo con un 10% para cubrir las necesidades de las plantas de fósforo; sin embargo, con mordenita más compost y clinoptilolita más compost nos tenemos que ir al 20% para cubrir las necesidades de fósforo.

El control, que era nuestro suelo de cantera, tenía un valor de CIC de 3,63, muy bajo, por debajo de 5 meq/100 g, indicando que se trata de un suelo poco fértil. Con los aumentos que provocamos en el complejo de cambio a medida que aumentamos el contenido de enmienda, los valores de la CIC llegan a ser de 50, pudiendo llegar a ser muy altos.

En la Tabla 9 vemos la evolución de la CIC en las diferentes enmiendas frente al control. Afinar un poco más en el comportamiento de la enmienda nos permite predecir que el compost en valores del 20% ya alcanzaría un valor óptimo, al igual que la mordenita más compost; y en el caso de clinoptilolita más compost el aumento de enmienda no se traduce en un incremento proporcional de la CIC, hecho que no deja de sorprendernos. Sólo la enmienda clinoptilolita más gallinácea admite enmiendas con un mayor porcentaje. Aunque también vemos con bajos porcentajes, éstos no suponen incrementos significativos de la CIC.

Tabla 9.

Valores de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y K⁺ de cambio en los diferentes tratamientos

	CIC (meq/1000 g)				Potasio (meq/1000 g)			
	5%	10%	20%	30%	5%	10%	20%	30%
Compost	27,57	45,43	52,78	55,50	0,95	1,48	3,50	3,75
Mordenita + compost	34,25	45,64	50,20	54,07	1,10	1,38	2,50	3,45
Clinoptilolita + compost	39,82	41,07	43,87	47,14	0,87	1,15	1,36	2,20
Clinoptilolita + gallinaza	19,86	26,18	35,63	42,18	0,85	0,97	1,70	1,85
Zeopro	9,50	19,56	38,00	57,00	0,94	1,10	2,05	3,06

La medida de la capacidad de intercambio catiónico permite afinar un poco más la forma de comportarse de la enmienda y predecir que en valores del 20% ya se alcanzaría un valor óptimo. Tanto en las mezclas de mordenita como de clinoptilolita el aumento de la proporción no se traduce en un incremento proporcional de la CIC. La medida de la capacidad de intercambio catiónico permite afinar un poco más la forma de comportarse la enmienda y predecir que en valores del 20% ya se alcanzaría un valor óptimo. Tanto en las mezclas de mordenita como de clinoptilolita el aumento de la proporción no se traduce en un incremento proporcional de la CIC.

Dentro del estudio realizado de los diferentes cationes de cambio, el más interesante para nosotros era el potasio por el efecto que podía tener la zeolita en el mismo ya que presenta una alta afinidad por el mismo (Hershey *et al.*, 1980). Lo que podemos comprobar es que en las enmiendas con zeolita la concentración de cambio de potasio se eleva a valores parecidos a las enmiendas orgánicas; y es de resaltar que la zeolita turca más la gallinácea, que es la que aparece en referencias bibliográficas, tiene menos capacidad de acumulación que las enmendadas con zeolita mordenita y clinoptilolita.

Tabla 10.

Valores promedio de 10 réplicas por tratamiento de la concentración de CO₂ ± desviación estándar, como parámetro para estimar la respiración celular

	CO ₂ (mmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)			
	5%	10%	20%	30%
Compost	0,23 ± 0,07	0,62 ± 0,08	0,97 ± 0,13	1,49 ± 0,12
Mordenita + compost	0,38 ± 0,10	0,58 ± 0,10	0,75 ± 0,07	0,87 ± 0,11
Clinoptilolita + compost	0,28 ± 0,20	0,18 ± 0,06	0,18 ± 0,07	0,54 ± 0,06
Clinoptilolita + gallinaza	0,33 ± 0,10	0,77 ± 0,14	0,63 ± 0,12	1,30 ± 0,24
Zeopro	0,16 ± 0,07	0,15 ± 0,06	0,28 ± 0,10	0,33 ± 0,11

Las enmiendas de clinoptilolita más gallinácea, sobre todo, y en menor grado mordenita más compost, mantienen valores de respiración casi 1:1 con respecto a la enmienda de compost. Esto pondría de manifiesto la capacidad de desarrollo de actividad microbiana en un grado similar teniendo la enmienda organozeolítica. Y la prueba contundente del efecto de la zeolita en la proliferación microbiana es la enmienda con zeopro, donde vemos que, sin tener materia orgánica, a medida que crece la proporción de zeolita aumenta la concentración de CO₂.

Por último, queremos destacar la evolución que sigue la concentración de amonio en las diferentes enmiendas.

Tabla 11.

Valores promedio de 10 réplicas por tratamiento de la concentración de ión amonio \pm desviación estándar

	NH_4^+ (meq/1000 g)			
	5%	10%	20%	30%
Compost	4,62 \pm 0,18	4,03 \pm 0,19	8,44 \pm 0,31	13,66 \pm 0,66
Mordenita + compost	2,33 \pm 0,07	2,72 \pm 0,08	7,72 \pm 0,13	8,78 \pm 0,35
Clinoptilolita + compost	3,73 \pm 0,20	5,50 \pm 0,17	5,19 \pm 0,03	12,01 \pm 0,35
Clinoptilolita + gallinaza	1,14 \pm 0,05	2,59 \pm 0,09	4,47 \pm 0,14	4,07 \pm 0,07
Zeopro	3,60 \pm 0,11	10,43 \pm 0,14	16,48 \pm 0,15	15,97 \pm 0,18

La forma nitrogenada en forma de amoniaco en nuestras condiciones debería ser baja pues con la temperatura del sustrato y la falta de humedad el amoniaco debería pasar a nitrato por nitrificación y una parte también se volatilizará en forma de amoniaco gas. Luego tendrá una importancia obvia, y es que en las enmiendas con zeolita las concentraciones deben ser mucho mayores, ya que los microcanales son selectivos para adsorber amonio o incluso gas amoniaco.

Llama la atención cómo a partir de los tratamientos al 10% el zeopro da las concentraciones más altas; en el tratamiento al 20% y 30%, sin embargo, no existen diferencias significativas. También es más alta la concentración de amonio en las enmiendas con zeolita-compost que la gallinácea con zeolita. Es preciso resaltar también los valores más altos en mordenita más compost frente al de clinoptilolita más compost, sobre todo en porcentajes del 20 y 30%, debido probablemente a la mayor capacidad de retención de humedad del suelo como hemos podido constatar en las cinéticas de secado de los diferentes tratamientos, pero que no presentamos en este trabajo.

3.4. Seguimiento de plantas: morfometría y supervivencia

Hay tres efectos fundamentales que han afectado al crecimiento y supervivencia en paralelo al que sea imputable a la enmienda: el clima, los efectos antropogénicos y el estado de las plantas del vivero.

El régimen hídrico habido durante el marco del ensayo ha sido crítico, tanto por la escasez de lluvias como por lo prolongado del periodo sin precipitación.

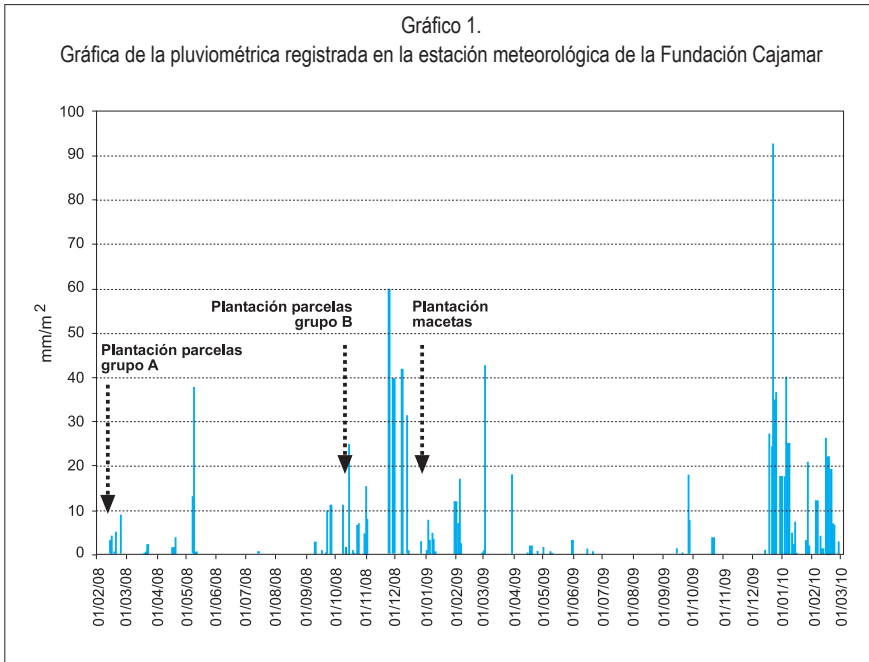
Las parcelas Tipo A que se plantaron entre los meses de febrero y final de marzo de 2009 tuvieron una primavera y un verano secos, con periodos de ochenta o noventa días sin precipitación rotos por lluvias de una cantidad escasa.

El final del otoño fue bastante lluvioso, lo que incidió sobre las plantas existentes y, sobre todo, sobre el estado del terreno en el que se plantaron las parcelas Tipo B, que durante los primeros meses de su trasplante disfrutaron de unas condiciones de humedad inmejorables. Sin embargo, las últimas lluvias registradas se midieron en el mes de abril y desde ese momento se registró un periodo de más de 140 días sin ningún aporte de lluvia. El final del año 2009 registró una de las más altas pluviometrías, lo que influirá sobre el crecimiento y supervivencia de aquí en adelante pero que no afecta al análisis de todo el ciclo.

El parámetro común a todas las parcelas de esta gráfica es el referido a la época de lluvia pero no así la cantidad. En un cuarenta por ciento de las parcelas, la frecuencia y cantidad de precipitación sería la de esta gráfica y en el restante sesenta por ciento, la cantidad de lluvia sería menor y en al menos una parcela, mucho menor.

Durante estos dos años las parcelas Tipo A han resistido dos ciclos de sequía con periodos considerados críticos como los cien días, pero no todas las especies ni todas las parcelas se han comportado de forma homogénea. Si entresacamos los mejores comportamientos, se podría adelantar que dos o tres especies presentan un índice de supervivencia superior al ochenta por ciento lo que supone que es factible revegetar con una primera tanda de taxones que van a colonizar el territorio con un grado muy alto de éxito mientras que sería necesario más esfuerzo para conseguir la implantación de otros taxones de la serie.

En dos casos, y con más influencia que el clima, nos hemos encontrado que la influencia del ser humano ha sido determinante. Una de las parcelas fue roturada para afianzar una línea de alta tensión, y otras dos han sufrido el paso continuado



de ganado hasta la extinción de algunas de las plantas. Por último, las plantas que usamos venían de viveros comerciales, no siempre estaban en las mejores condiciones, y con seguridad no habían pasado un periodo de aclimatación. Parece sintomático que se haya registrado una mortandad total de alguna especie, y es presumible que el efecto fundamental se deba al estado de la planta en el momento de su transplante.

3.4.1. Escala parcela

A lo largo de los dos años que ha acumulado el experimento en las parcelas del grupo A y el año en las del grupo B, el resumen de las medidas de supervivencia de los taxones introducidos se sintetiza en el Gráfico 2.

Considerando el promedio global de todas las plantas y de todas las parcelas, la supervivencia en las parcelas con enmienda es del 49,16%, mientras que en las parcelas control la tasa es del 32,5%, es decir, la parcela enmendada aumenta un 16,67% la tasa de supervivencia.

Aunque el dato entre los dos ensayos no sea muy relevante lo que sí parece serlo es la tendencia de las dos gráficas por cuanto la mortandad en las parcelas aumenta la pendiente una vez sobrepasados dos ciclos estivales, sugiriendo que la supervivencia al cumplir los cuatro o cinco años no diferirá de los valores referenciados en la bibliografía.

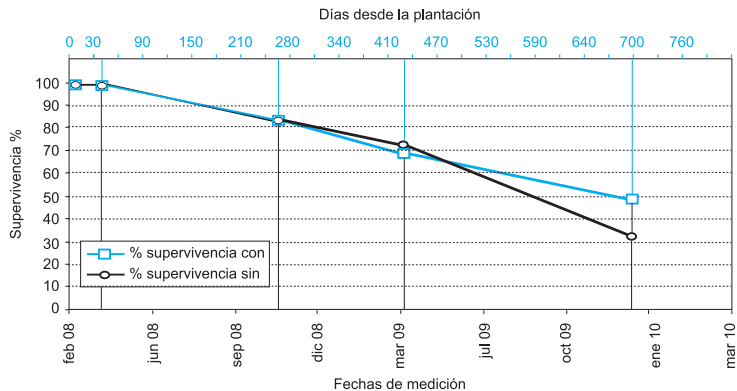
La tendencia al equilibrio que muestra la curva enmendada hace suponer que en ese mismo periodo la supervivencia puede rondar el cuarenta por ciento, que puede significar una mejora cercana al cien por cien.

Este dato general tiene varios matices que habrá que desarrollar con más detalle pero que se pueden resumir de la siguiente manera:

Respecto a las parcelas, es de resaltar que en dos de ellas del grupo A (Vicar y Dalías) y en una del grupo B (El Ricaveral) la supervivencia ha sido menor del 25%, tanto en las enmendadas como en la testigo. El análisis de lo ocurrido en los tres casos sugiere la existencia de condiciones de suelo y/o climatología muy negativas que probablemente prevalezcan sobre la incidencia que haya podido tener la enmienda.

En esos tres ejemplos, aunque la mortandad ha sido muy elevada, la supervivencia de una o dos especies es muy llamativa. Del conjunto de la experiencia se deduce que en lugares tan extremos se hace aconsejable elegir un grupo reducido de taxones en vez de apostar por la amplitud de la revegetación con el grueso de la serie vegetal de la zona.

Gráfico 2. Evolución estacional de la supervivencia en todas las parcelas, comparando la parcela con enmienda frente a la control en valores promedios de todas las especies

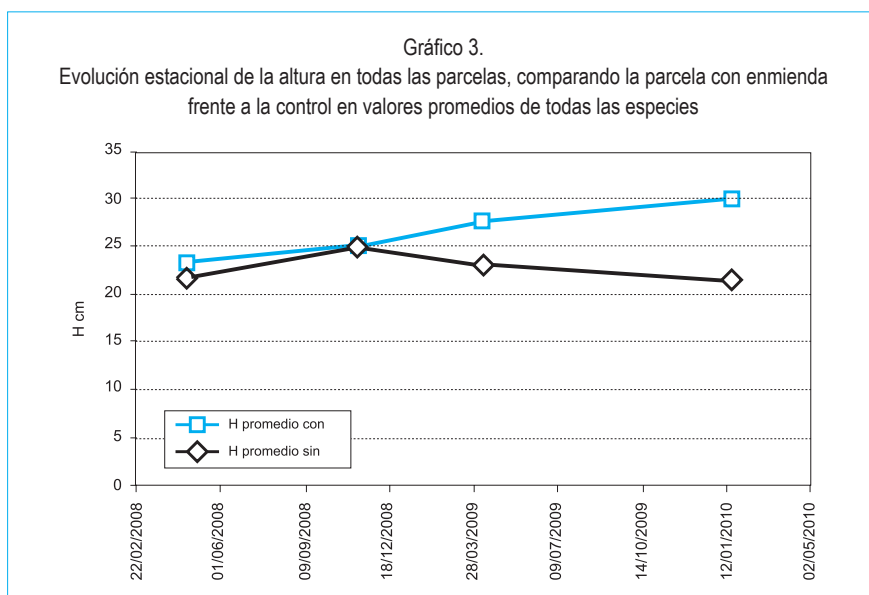


Del conjunto de especies que han sobrevivido según la media en todos aquellos lugares en los que se han plantado, es de destacar que *Ephedra Fragilis*, *Olea europaea*, *Genista spartioides* y *Stipa tenacissima* presentan supervivencias superiores al 65%, y en estos casos los valores con la enmienda mejoran por encima del 20% con respecto a los del control.

La otra medida relevante es la del crecimiento de las plantas que se ha seguido mediante la visita regular a las parcelas y la medida sistemática en varias plantas de la misma especie de la altura, grosor del tallo y crecimiento en los ejes Norte-Sur y en el Este-Oeste.

Según vemos en el gráfico adyacente se produce un crecimiento promedio de todas las especies que es mayor en la parcela con enmienda organozeolítica frente a la control.

El gráfico de alturas de las plantas indica no sólo una diferencia media de altura total en centímetros, sino un dato con más interés a largo plazo. Las pendientes de crecimiento siguen tendencias opuestas. Mientras que ambos ensayos mantuvieron la misma tendencia hasta el otoño del primer año, por lo que parece ser un efecto de la influencia de la propia planta recién plantada y del clima. Las plantas que han dispuesto de la enmienda y se han beneficiado de la mejora registrada en el suelo han empezado a diferenciar su crecimiento en altura manteniendo una tendencia al alza.

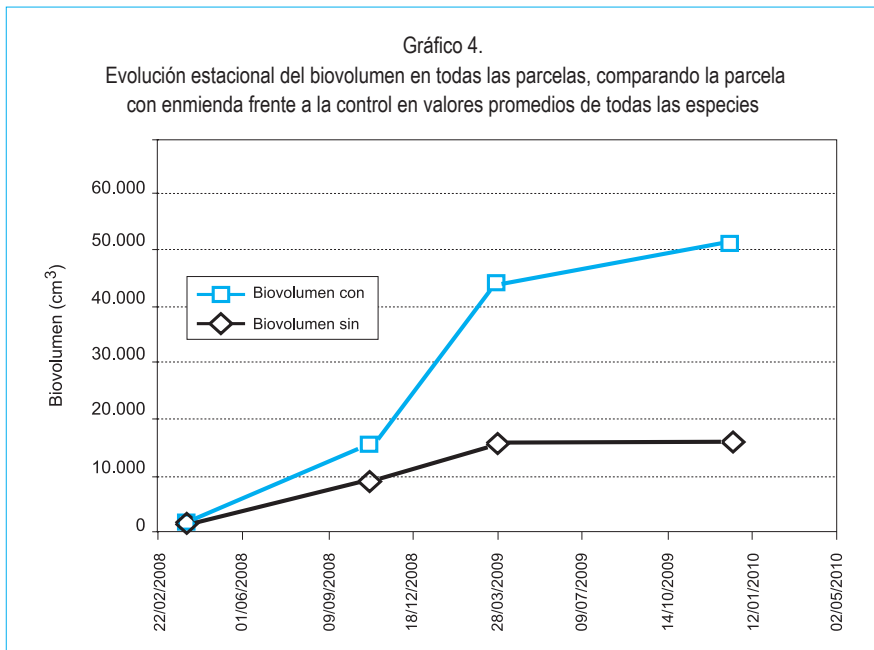


Un dato paralelo que se ha registrado referente al crecimiento de las plantas ha sido la medida puntual del crecimiento de la parte aérea y de las raíces que se realizó sobre cuatro unidades de *Ephedra fragilis* que se criaron en un lisímetro al aire libre sin otro riego que el propio de la lluvia.

Las cuatro unidades se plantaron una en un suelo tipo y las otras tres en el mismo suelo enmendado con la misma cantidad de mezcla, pero variando el tipo de zeolita añadida a la parte orgánica.

La información relevante que complementa a lo que se entiende que es el crecimiento de las plantas de las parcelas es la mostrada en el Gráfico 4 sobre el desarrollo radicular y que muestra de forma fehaciente que el crecimiento radicular es de varios órdenes de magnitud superior para las plantas enmendadas lo que probablemente soporta las diferencias registradas tanto en la mortandad como en el crecimiento.

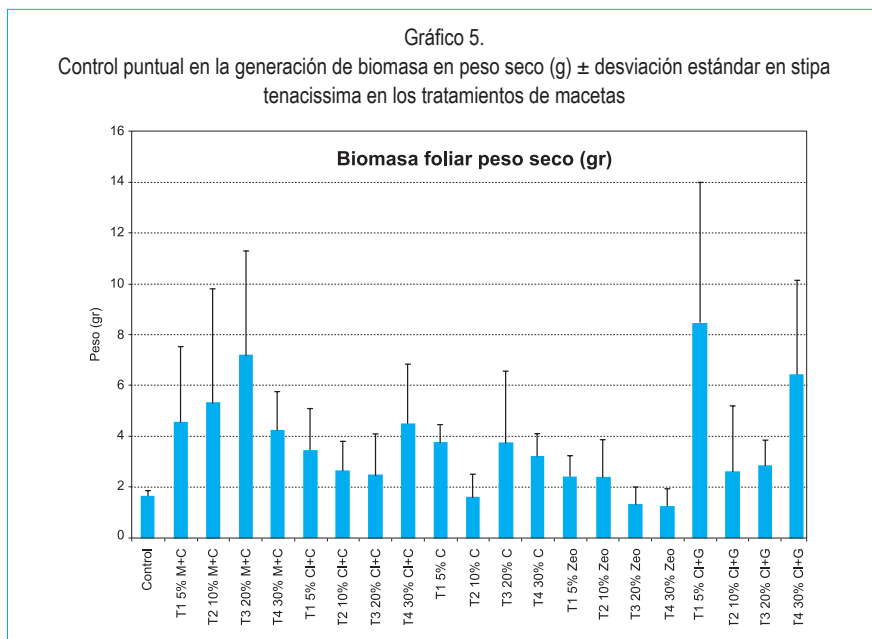
Puesto que las plantas han estado sometidas a todas las influencias ambientales, incluidas las humanas, el índice de crecimiento en altura es parcialmente indicativo. En al menos dos parcelas se ha registrado una presencia constante de rebaños que han ramoneado en varias épocas modificando de forma la parte aérea, pero sobre todo, la altura.



La medida compensatoria para registrar el crecimiento es la del biovolumen que se puede presentar al haber registrado de forma sistemática los parámetros del tallo y crecimiento en los tres ejes. El resumen del estado de las parcelas según el cálculo del biovolumen aporta una visión de las diferencias y de las tendencias de desarrollo que hay que tomar en consideración. Las plantas de las parcelas control han estabilizado su porte y el aumento de biomasa aérea se mantiene a un ritmo creciente muy tenue.

Las plantas enmendadas aumentan su porte y crecimiento de la biomasa en valores que podemos resumir como de muy significativos; en especial por poder resaltar que el crecimiento empieza a hacerse notable una vez la planta se ha asentado en el terreno y no en función de las condiciones iniciales. Para confirmar este argumento, se hizo un seguimiento intensivo de control de biomasa aérea en peso seco, como podemos apreciar en el Gráfico 5.

Comprobamos, según valores, cómo se produce un incremento muy significativo en generación de biomasa aérea expresada en peso seco (gramos) en los tratamientos al 30%. Sin embargo en los tratamientos al 5 y 10% la generación de biomasa total en peso seco es más parecida al control.



Nota: Control (O), mordenita más compost (M+C), clinoptilolita+compost (CL+C), zeolita cargada (zeo) y Gallinaza+clinoptilolita (CL+G). La línea discontinua es la de referencia del control.

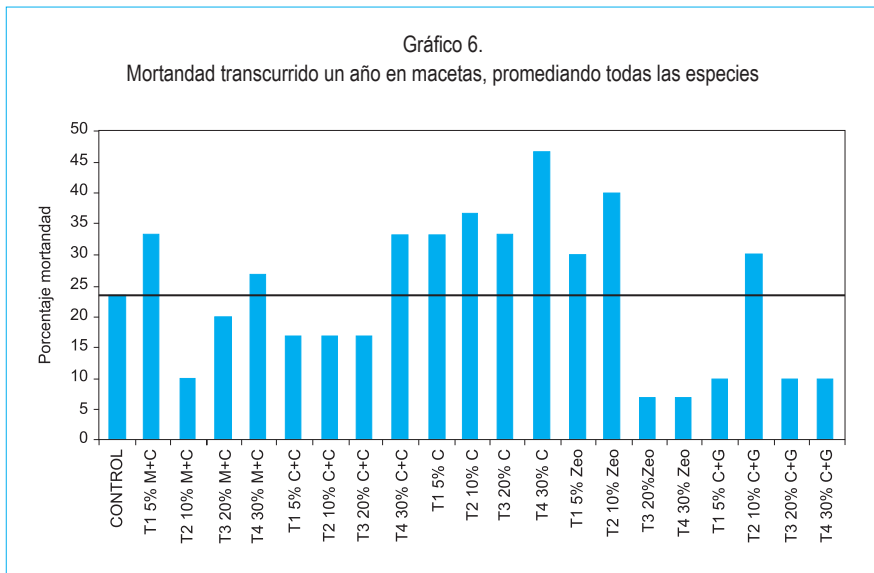
3.4.1. Escala maceta

La información que aporta una gráfica de mortandad, en la que se engloban todas las especies y todos los substratos, no permite tener más que una visión general de la influencia que tienen las enmiendas, sus composiciones y la cantidad aplicada sobre las plantas.

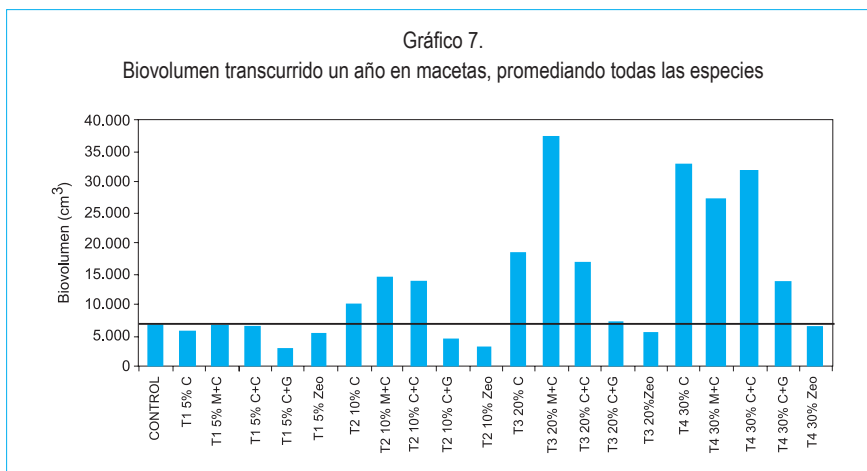
Si bien la supervivencia al cabo del primer año es del 76%, superior a lo registrado en las parcelas al aire libre en su primer año, lo más relevante es el análisis de cómo parece haber influido la enmienda.

En lo que afecta a otros ensayos en los que sólo se utiliza materia orgánica, bien de compost o de lodos de depuradora, los datos de mortandad indican que en líneas generales sólo el compost en cualquier proporción, y el zeopro en cantidades bajas, aumentan la mortandad frente a las condiciones testigo.

El añadido de zeolita, bien mordenita o clinoptilolita, a la hora de preparar la enmienda, ejerce un efecto especialmente positivo de cara a garantizar la supervivencia de las plantas en su primer año de existencia.



Nota: Control (O), mordenita más compost (M+C), clinoptilolita+compost (CL+C), zeolita cargada (zeo) y Gallinaza+clinoptilolita (CL+G). La línea discontinua es la de referencia del control.



Nota: Control (O), mordenita más compost (M+C), clinoptilolita+compost (CL+C), zeolita cargada (zeo) y Gallinaza+clinoptilolita (CL+G). La línea discontinua es la de referencia del control.

En líneas generales, el uso de un aditivo orgánico como la gallinaza mejora la supervivencia frente al uso del tipo de compost utilizado, al igual que parece que la clinoptilolita reduce la mortandad frente a la utilización de la mordenita en igualdad de condiciones.

Estos datos generales, sin embargo, no aportan toda perspectiva necesaria cuando se trata de analizar el comportamiento de cada uno de los taxones y que al igual que ocurre con el conjunto de las plantas, revelan cambios substanciales.

Según los datos queda claro que los mejores comportamientos los obtenemos con las enmiendas al 30%, remarcando que el buen resultado que se obtiene con el compost queda enturbiado por su alta mortandad, como vimos anteriormente. Es preciso resaltar el buen comportamiento del T3 M+C, que es el que mayores valores da.

4. Conclusiones

A la vista de los estudios realizados en las diferentes escalas podemos concluir, aunque no de forma definitiva por el periodo de estudio de los diferentes experimentos, que:

- En líneas generales siempre aumenta la calidad del suelo aumentando el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el reservorio de nutrientes.
- Se ejerce un efecto positivo en la mejora de la alcalinización del suelo.
- Se incrementa significativamente la supervivencia de las especies en las parcelas enmendadas frente a las parcelas de control.
- Se aumenta el crecimiento estacional de plantas, pero, sobre todo, conseguimos un crecimiento en biovolumen muy significativo.
- Se demuestra la validez del compost de productos hortofrutícolas como aporte orgánico para el suelo.
- Se comprueba que la adición de la zeolita a la parte orgánica genera un compuesto con propiedades diferentes a la materia orgánica, base que incide en varios parámetros pero significativamente sobre la disminución de la mortandad.
- Se ha delimitado la influencia de cuatro enmiendas distintas sobre diez taxones-tipo de las restauraciones ecológicas, y se ha definido la mejor relación para cada una de ellas.
- Se ha comprobado que el uso de la enmienda alarga la disponibilidad de humedad en el suelo en periodos de tiempo considerables.
- Se ha constatado un aumento significativo de germinaciones naturales y de aumento de la cobertura en aquellas zonas tratadas con la enmienda.

Luego, podemos concluir que el uso de enmiendas organozeolíticas mejora en comportamiento de lo que sería la correspondiente enmienda orgánica, que produce cambios positivos en el suelo, mejora el desarrollo radicular, el vigor de la parte aérea de la planta y supone una ayuda notable a la hora de conseguir afianzar la restauración ecológica de los ambientes semiáridos con problemas críticos de suelo y falta de humedad.

Referencias bibliográficas

- > Allen, E. R. y Ming, D. W. (1995), "Recent progress in the use of natural zeolites in agronomy and horticulture", en Ming, D. W. y Mumpton, F. A., eds., *Natural Zeolites'93 Occurrence, Properties, Use. Int'l Comm Natural Zeolites*, Brockport, Nueva York; pp. 477-490.
- > Aguilar, M. A.; Ordóñez, R. y González, P. (1999), "Capacidad de aportación de macronutrientes de un lodo de depuradora a un cultivo de ray-grass y calidad de los lixiviados", en Muñoz-Carpena, R.; Ritter, A. y Tascón, C., eds., *Estudios de la zona no saturada*, ICIA; pp. 139-143.
- > Ames, L. L. (1967), "Zeolite removal of ammonium ions from agricultural wastewater", en *Proc. 13th Pacific Northwest Indust. Waste Conf.*, Washington State Univ., Pullman, Washington; pp. 135-152.
- > Bernal, M. P.; López-Real, J. M. y Scott, K. M. (1993), "Application of natural zeolites for the reduction of ammonia emissions during the composting of organic wastes in a laboratory composting simulator", en *Bioresource Technology* (43); pp. 35-39.
- > Bremner, J. M. y Mulvaney, C. S. (1982), "Nitrogen total", en Page, A. L. *et al.*, *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Inc Madison, Wisconsin; pp. 595-624.
- > Brockway, D. G. (1983), "Forest floor, soil, and vegetation responses to sludge fertilization in red and white pine plantations", en *Soil Sci. Soc. Am. J.* (47); pp. 776-784.
- > Brown, K. H.; Bouwkamp, J. C. y Gouin, F. R. (1998), "The influence of C:P ratio on the biological degradation of municipal solid waste", en *Compost Science and Utilization* 6(1); pp. 53-58.
- > Boletín Oficial del Estado (1998): "Orden de 28 de mayo de 1998 sobre fertilizantes y afines"; núm. 131, pp. 18028-18078.
- > Calvo Pérez, B.; Costafreda Mustelier, J. L. y Estévez, E. (2005), *IX Congreso de Geoquímica en España-V Congreso Ibérico de Geoquímica*, Soria, del 20 al 23 de septiembre de 2005.
- > Cortina, J.; Valdecantos, A.; Fuentes, D.; Casanova, G.; Vallejo, R.; Díaz Bertrana, J. M.; Llavador, F. y Ruano, R. (2001), "El uso de biosólidos en el sector forestal valenciano", en *Foresta* 13, pp. 64-69.

- > Costafreda Mustelier, J. (2008), *Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo Volcánico de Cabo Gata (Almería)*, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- > Damian, F. y Damian, G. (2007), "Detoxification of Heavy Metal Contaminated Soils", *American Journal of Environmental Sciences* 3 (4): 193-198.
- > Dickson, N.; Richard, T. L. y Kozlowski, R. E. (1991), *Composting to Reduce the Waste Stream: A Guide to Small Scale Food and Yard Waste Composting*, Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES), Ithaca, Nueva York.
- > Eber, D. (2002), "Controlled-Release Fertilizers Using Zeolites", *US Geological Survey*.
- > Hershey, D. R.; Paul, J. L. y Carlson, R. M. (1980), "Evaluation of potassium-enriched clinoptilolite as a potassium source for potting media", *Hort Science* (15); pp. 87-89.
- > Inbar, Y.; Chen, Y. y Hoitink, H. A. (1993), "Properties for establishing standards for utilization of compost in container media", en Hoitink, H. A. y Keener, H. M., ed., *Science and Engineering of Composting: Design, Microbiological and Utilization Aspects*, Renaissance Publications, Wothington, Ohio; pp. 668-694.
- > Mathur, S. P. (1991), "Composting processes", en Martin, A. M., ed., *Bioconversion of waste materials to industrial products*, Elsevier Applied Science, Nueva York; pp. 147-183.
- > McGaughey, P.H. y Gotass, H. B. (1973), *Stabilisation of municipal refuse by composting*, American Society of Civil Engineers Transactions, Proceedings-Separate N° 302, Paper N° 2767; pp. 897-920.
- > Milán, Z.; Sánchez, E.; Weiland, R.; Borja, A.; Martin y Ilangovan (2001), "Influence of different natural zeolite concentrations on the anaerobic digestion of piggery waste", *Bioresource Technology*, volumen 80, Issue 1; pp. 37-43.
- > Minato, H. (1968), *Characteristics and uses of natural zeolites*, *Koatsugasu* (5); pp. 536-547.
- > Ming, D. W. y Allen, E. R. (2000), "Recent advances in the United States in the use of natural zeolites in plant growth", en Colella, C. y Mumpton, F. A., eds., *Natural Zeolites for the Third Millenium*, De Frede Editore, Nápoles; pp. 417-426.

- > Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (1986), *Métodos Oficiales de Análisis*, vol. III, Madrid.
- > Montalbo, S.; Díaz F.; Guerrero L.; Sánchez, E. y Borja, R. (2005), "Effect of particle size and doses of zeolita addition on anaerobic gigestion processes of synthetic and piggery wastes", en *Process Biochemistry*, volume 96, issue 3-4; pp.1475-1481.
- > Morisaki, N.; Phae, C. G.; Nakasaki, K.; Shoda, M. y Kubota, H. (1989), "Nitrogen transformation during thermophilic composting", *J. Ferment. Bioengng.* (67); pp. 57-61.
- > Leggo, P. J. y Ledésert, B. (2001), "Use of organo-zeolitic fertilizer to sustain plant growth and stabilize metallurgical and mine-waste sites", *Min. Mag.* 65 (5); pp. 563-570.
- > Leggo, P. J.; Ledésert, B. y Christie, G. (2006), "The role of clinoptilolite in organo-zeolitic-soil systems used for phytoremediation", en *Sci. Total. Environ.* (363); pp. 1-10.
- > Perrin, T. S.; Drost., D. T.; Boettinger, J. L. y Norton, J. M. (1998), "Ammonium loaded clinoptilolite: A slow release nitrogen fertilizer for sweet corn", en *J. Plant Nutrition* (21); pp. 515-530.
- > Richard, T. L. (1992), "Municipal solid waste composting: physical and biological processing", en *Biomass and Bioenergy* 3 (3-4); pp. 163-180.
- > Tada ChiKa, Yang Yingnan, Hanaoka Toshiaki, Sonoda Akinari, Ooi Kenta y Sawayama (2005), "Effect of natural zeolite on methane production for ananerobic digestion of ammonium rich organic sludge", en *Bioresource Technology*, volume 96, issue 4; pp. 459-464.
- > Urbina-Sánchez, E.; Baca-Castillo, G.; Núñez-Escobar, M.; Colimas-León, L.; Tijerina-Chávez y Tirado-Torres, J. (2006), "Cultivo hidropónico de plántulas de jitomate en zeolita cargada con K⁺, Ca²⁺ o Mg²⁺ y diferente granulometría", en *Agrociencia* (40); pp. 419-429.
- > US Environmental Protection Agency (US EPA) (1992), "Sampling procedures and analytical methods", en *Environmental Regulations and Technology. Control of Pathogens and vector Attraction in Sewage Sludge*, EPA/626/R-95/013. USEPA, Office of Research and Development, Washington DC; pp. 41-47.

- > Vallin; Marrero, V.; Muñiz, O.; Beltrán, R.; Sotlongo, J.; Gil, R.; Delgado, N. y Chong, D. (1998), "Generalización del empleo de la zeolita, como aditivo de la urea en cultivos de importancia económica", en *Producción de cultivos en condiciones tropicales*; pp. 193-195.
- > Walkley, A. y Black, I. A. (1934), "An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method", en *Soil Sci.* (37); pp. 29-38.
- > Witter, F. y López-Real, J. (1988), "Nitrogen losses during the composting of sewage sludge, and the effectiveness of clay soil, zeolites and compost in adsorbing the volatilized ammonia", en *Biological Wastes* (23); pp. 279-294.