Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Estudio de los flujos hídricos en las dunas de Guardamar del Segura.

Luis Fernando Romero Castellanos

Tesis Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departament d'Ecologia

Departamento de Ecología

ESTUDIO DE LOS FLUJOS HÍDRICOS EN LAS DUNAS DE GUARDAMAR DEL SEGURA

LUIS FERNANDO ROMERO CASTELLANOS

Alicante, 2007

UNIVERSITAT D' ALACANT

UNIVERSIDAD DE ALICANTE

ESTUDIO DE LOS FLUJOS HÍDRICOS EN LAS DUNAS DE GUARDAMAR DEL SEGURA

TESIS DOCTORAL

LUIS FERNANDO ROMERO CASTELLANOS

MARZO 2007

DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

ESTUDIO DE LOS FLUJOS HÍDRICOS EN LAS DUNAS DE GUARDAMAR DEL SEGURA

Memoria presentada por
Luis Fernando Romero Castellanos
Para optar el grado de Doctor en Ciencias Biológicas

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Bajo la dirección de:

Dra. María José Lledó Solbes
Dpto. de Ecología

Dr. Pedro Jáuregui Eslava
Dpto. Ciencias de la Tierra y del medio ambiente

Alicante, marzo de 2007

A mis padres, Fernando y Frionilde.
A mi hermana Sofía.
A Samirna.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Dedicatoria

A los que ya no están.

Me gustaría dedicar esta Tesis a la memoria de aquellos familiares, amigos que fui perdiendo durante mi estadía en España y que nunca podré volverlos a ver, pero sin duda alguna están en mi mente y sobre todo en mi corazón.

A Andrea y Hermencia mis dos estupendas y maravillosas abuelas, mujeres campesinas humildes y trabajadoras, quienes me enseñaron valores tan importantes que se deben tener en cuenta en la vida de todo ser humano y pase lo que pase jamás se deben olvidar.

A mi abuelo Antonio, trabajador incansable, pero debo decirlo a veces de difícil temperamento.

A mi prima Gladys quien siempre soñaba que algún día pudiéramos celebrar este triunfo académico, pero que por cosas de la vida partió a la eternidad.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

A mis amigos Puchelos, Omar, Yaser, Don Elías y Don Pablo con quienes compartí excelentes momentos.

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios por darme fuerza, paciencia, salud y sabiduría en este largo y difícil camino.

Agradezco enormemente al departamento de ecología por brindarme la oportunidad de adelantar mis estudios de doctorado, también agradecer a las diferentes instituciones (Generalitat Valenciana e instituto Alicantino de Cultura Gil Albert) por el apoyo económico para la realización de esta tesis doctoral.

A la Universidad de Pamplona Colombia por haberme dado el apoyo económico para salir a capacitarme y poder luego regresar a contribuir con un granito de arena en la formación de esos jóvenes colombianos que tanto lo necesitan. A Freddy Solano vicerrector de investigaciones quien me dio la oportunidad de pertenecer al alma mater. A Mariano Useche excelente maestro a quien tuve la dicha de conocer y que con sus sabios concejos me animaron a partir un día de Colombia a formarme. A Jacipt compañero y ante todo gran amigo por sus voces de aliento y colaboración.

A la Dra María José Lledó por haberme apoyado y guiado en este camino difícil pero no imposible.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Al Dr Pedro Javier Jáuregui, excelente persona, tanto en lo académico como en lo personal, quien con su apoyo incondicional me ha orientado en todo momento, aún en los días más difíciles. Debo decirlo sinceramente es un gran profesor, pues tiene todas las dotes para serlo.

A mis padres Fernando y Frionilde humildes campesinos de ese hermoso país llamado Colombia, que con enormes sacrificios me han podido dar estudios desde la primaria hasta la universidad. Además con sus oraciones diarias me han encomendado al todo poderoso para poder cumplir este reto tan difícil.

A mi querida hermana por apoyarme en todo momento y colaborarme en la Universidad de Pamplona en todas las gestiones a veces difíciles.

A mi novia Samy, persona maravillosa e incondicional, que tuve la oportunidad de conocer en la Universidad de Alicante, de la cual me enamore y que en un par de meses se convertirá para siempre en mi esposa.

A la familia cañas en especial a mi amigo de toda la vida Marco Aurelio por sus enormes gestos de amistad, de verdad mil gracias.

Al Dr Dario Miranda, gran profesional de la empresa colombiana de petróleos y quien me brindo la oportunidad de pertenecer a tan magnifico grupo.

A Ciro Antonio amigo de toda la vida, excelente persona quien día a día con sus e-mail me daba animo para sacar este proyecto adelante, también a su familia mil gracias.

Un reconocimiento muy especial a Dr Antonio Escarre y Dr Andreu Bonet quienes me guiaron y me colaboraron días después de haber llegado al departamento de ecología. Asimismo extender mi agradecimiento a todos los miembros del departamento, tanto a profesores como becarios, que siempre han estado cerca para colaborarme y darme apoyo en todo lo necesario ellos son: Adela, Marina, Ángeles, Rosario, Alicia, Silvia, Fina, David Ramírez, David Collantes, Esteban, Eulogio, Emilio, Daniel, Juanrra, José, Juanfra, Misael, Issan, Jamal,.... en fin a todos. De verdad gracias por su humanidad y estoy seguro que desde mi Colombia los recordare siempre.

Agradecer a Nassim, formidable persona, hermano, amigo y compañero de estudios en la Universidad de Alicante que con su valiosa colaboración contribuyo a sacar adelante este proyecto.

Al Dr José Giner, por darme la oportunidad de formar parte del equipo de geofísica en la Universidad de Alicante durante más de tres años.

A los amigos Cubanos Alberto, Ángel, Frances, Fidel, en fin a todos los del Gabinete de Arqueología de la Habana, por sus valiosos gestos de amistad y de colaboración durante la realización del proyecto Geosis de la Universidad de Alicante. También agradecer muy especialmente al profesor Orestes de la Universidad de Pinar del Río por sus valiosos aportes académicos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Excelente maestro es aquel que, enseñando poco, hace nacer en el alumno un deseo grande de aprender... A.Graf

Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano. Sorcha Carey

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Cuando conozco a alguien no me importa si es blanco, negro, judío o musulmán... Me basta con saber que es un ser humano. Walt Whitman

INDICE:

		Página
	CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.0	INTRODUCCIÓN	3
1.1	ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ECOSISTEMAS DUNARES	7
1.2	SISTEMAS DUNARES COSTEROS DE ESPAÑA	9
1.3	EL ECOSISTEMA DUNAR DE GUARDAMAR DEL SEGURA	11
1.3.1	Repoblaciones	11
1.3.2	Situación actual	12
1.3.3	Estudios llevados a cabo en la zona en los últimos años	13
1.4	PLAN DE TESIS	15
1.5	OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO	16
1.6	HIPOTESIS	16
	CAPÍTULO II ÁREA DE ESTUDIO	19
2.0	AREA DE ESTUDIO	20
2.1	LOCALIZACIÓN	21
2.2	CLIMA	22
2.3	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	23
2.4	SUELOS	23
2.5	HIDROGEOLOGÍA	24
2.6	VEGETACIÓN	25
	CAPÍTULO III PRECIPITACIÓN	27
3.1	INTRODUCCIÓN	29
3.2	OBJETIVOS	31
3.2.1	General.	31
3.2.2	Específicos	31
3.3	MATERIAL Y METODOS	31
3.3.1	Sitio de muestreo	31
3.3.2	Muestreo de la precipitación	32
3.3.3	Métodos de laboratorio	33
3.3.3.1	Medida del pH y la Conductividad	33
3.3.3.2	Análisis de los iones	34
3.3.4	Métodos estadísticos	34
3.4	RESULTADOS	35
3.4.1	Volumen de la precipitación	35
3.4.2	Química de la precipitación	37
3.4.2.1	Evolución anual y estacional de los iones	37
3.4.2.2	Origen de los iones	45
3.4.2.3	Relación entre el cloruro y el sodio	46

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.4.2.4	Relación entre el magnesio y el sodio	47
3.4.2.5	Relación entre el calcio y el magnesio	48
3.4.2.6	Relación entre el sulfato y el cloruro	49
3.4.2.7	Análisis multivariante de la precipitación de Guardamar del Segura	50
3.5	CONCLUSIONES	52
	CAPÍTULO IV TRASCOLACIÓN	54
4.1	INTRODUCCIÓN	56
4.2	OBJETIVOS	58
4.2.1	General	58
4.2.2	Específicos	58
4.3	MATERIAL Y METODOS	58
4.3.1	Sitio de muestreo	58
4.3.2	Muestreo de la trascolación	59
4.3.3	Plan de Muestreo	61
4.3.4	Métodos de laboratorio	61
4.3.5	Métodos estadísticos	61
4.4	RESULTADOS	61
4.4.1	Procesos implicados en la química de la trascolación	63
4.4.2	Concentraciones iónicas medias de cada especie	65
4.4.3	Comparación de las concentraciones medias de la trascolación observadas entre especies y entre tamaños	66
4.4.4	Concentraciones netas de trascolación (TrN)	67
4.4.5	Tasas de enriquecimiento iónico (EI)	69
4.5	CONCLUSIONES	71
	CAPITULO V ESCORRENTÍA CORTICAL	74
5.1	INTRODUCCIÓN	76
5.2	OBJETIVOS	77
5.2.1	General	77
5.2.2	Específicos	77
5.3	MATERIAL Y METODOS	78
5.3.1	Muestreo de la escorrentía cortical	78
5.4	RESULTADOS	80
5.4.1	Análisis de los volúmenes de escorrentía cortical	80
5.4.2	Índice de canalización	82
5.4.3	Química de la escorrentía cortical	82
5.4.4	Química de la escorrentía cortical por clase diamétrica	84
5.4.5	Concentraciones netas [EcN]	86
5.4.6	Tasas de enriquecimiento (E)	87
5.5	CONCLUSIONES	88

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO VI ESTUDIO DEL AGUA DEL SUBSUELO 90

6.1 INTRODUCCIÓN 92
6.2 OBJETIVOS 93
6.2.1 General 93
6.2.2 Específicos 93
6.3 MATERIAL Y METODOS 93
6.3.1 Sondeos mecánicos. 93
6.3.2 Sondeos eléctricos verticales (S.E.V) 96
6.3.3 Evolución y características químicas del agua del subsuelo 99
6.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE RESISTIVIDAD 100
6.4.1 Potencial originado por una fuente puntual en la superficie de un semiespacio homogéneo 100
6.4.2 Expresión de la resistividad para un dispositivo de cuatro electrodos. 104
6.4.3 El concepto de anomalía en el método de r_a. 107
6.4.4 Variantes de calicatas eléctricas o electroperfilaje de resistividad aparente 108
6.4.5 Tipos de dispositivos empleados. 109
6.4.5.1 Dispositivos lineales con Zona de Exploración Central 109
6.4.5.2 Dispositivos lineales con Zona de Exploración Lateral 109
6.4.5.2.1 Polo-Dipolo 109
6.4.5.2.2 Dipolo-Dipolo 109
6.4.5.3 Gradiente de potencial 109
6.4.5.4 Dispositivos divergentes 110
6.4.5.5 Dispositivos de dos componentes 110
6.4.5.6 Dispositivos de corrientes enfocadas 111
6.4.6 Anomalías 113
6.4.6.1 Modelos teóricos 113
6.4.6.2 Caso de los contactos 114
6.4.6.3 Caso de cuerpos estratiformes 114
6.4.6.3.1 Capas potentes o gruesas 114
6.4.6.3.2 Capas finas 114
6.4.6.4 Factores que desfiguran las anomalías de Perfilaje Eléctrico de r_a. 119
6.4.6.5 El problema de la elección de las dimensiones del dispositivo y la profundidad de investigación 121
6.4.6.6 Variantes de sondeo eléctrico vertical de resistividad aparente 125
6.4.6.7 Modelos de cortes geoeléctricos y anomalías típicas vinculadas 126
6.4.6.7.1 El caso del modelo geoeléctrico estratificado de 2 capas 126
6.4.6.7.2 El caso del modelo geoeléctrico estratificado de 3 capas 130
6.4.6.7.3 El caso del modelo geoeléctrico estratificado de 4 capas 131
6.4.6.8 La adquisición de Datos 133
6.4.6.8.1 El problema de la selección de las distancias sucesivas en la 133

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

	línea del emisor	
6.4.6.8.2	Metodología Básica de Campo	135
6.4.6.8.3	Procesamiento, presentación e interpretación de los resultados	135
6.4.6.8.3.1	Los objetivos de la etapa de Interpretación Cuantitativa	137
6.5	RESULTADOS	139
6.5.1	Interpretación cualitativa del S.E.V	139
6.5.2	Interpretación cuantitativa del S.E.V.	140
6.6	Evolución del nivel freático	159
6.7	Características químicas del agua de subsuelo.	162
6.7.1	pH.	166
6.7.2	Cloruro	166
6.7.3	Relación rNa^+/rCl^-	169
6.7.4	Sulfatos	174
6.8	CONCLUSIONES	174
	CAPITULO VII VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE GEORRADAR PARA EL ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR	176
7.1	INTRODUCCIÓN	178
7.2	OBJETIVOS.	179
7.2.1	General.	179
7.2.2	Específicos.	180
7.3	FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN CON GPR	180
7.3.1	Propagación de ondas electromagnéticas.	180
7.3.2	Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas.	183
7.4	PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS A TENER EN CUENTA EN LA INVESTIGACIÓN CON GPR.	187
7.4.1	Conductividad.	187
7.4.2	Permitividad dieléctrica.	188
7.4.3	Permeabilidad magnética.	189
7.4.4	Efecto de la humedad.	190
7.5	METODOS DE OBTENCIÓN DE DATOS CON GPR.	191
7.5.1	Adquisición en perfiles.	192
7.5.2	Adquisición puntual.	192
7.6	PRINCIPIOS DEL RADARGRAMA.	192
7.7	COMPONENTES DE UN EQUIPO GPR.	195
7.7.1	Unidad central.	196
7.7.2	Antenas.	198
7.7.2.1	Modo Monoestático	199
7.7.2.2	Modo Biestático	200
7.7.3	Parámetros de las antenas.	200
7.7.3.1	Profundidad de investigación.	201
7.7.3.2	El tipo del suelo	201
7.8	MATERIAL Y METODOS.	204

Universidad de Alicante

7.8.1	Zona de estudio.	204
7.8.2	Equipo utilizado.	204
7.8.3	Fase experimental.	206
7.8.4	Metodología aplicada en el estudio del sistema radicular de las dos especies de pino del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.	208
7.9	RESULTADOS.	211
7. 10	CONCLUSIONES	222
	CAPITULO VIII APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS AGUA Y NUTRIENTES POR LA PINADA	224
8.0	INTRODUCCIÓN	226
8.1.	TASAS DE ENRIQUECIMIENTO DE LA TRASCOLACIÓN Y ESCORRENTIA CORTICAL EN LAS DOS ESPECIES DEL ECOSISTEMA DUNAR.	227
8.2.	APORTES DE NUTRIENTES POR DEPOSICIÓN GLOBAL	230
8.2.1.	Extrapolación al ecosistema dunar: aportes de agua y algunos nutrientes por trascolación	234
8.3.	APORTES POR ESCORRENTIA CORTICAL	236
8.4.	DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD EN EL ECOSISTEMA DUNAR	239
8.5.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL SISTEMA RADICULAR DEL ECOSISTEMA DUNAR CON METODOS NO INVASIVOS (GPR).	241
8.6.	CONCLUSIONES	245
	CAPITULO IX CONCLUSIONES GENERALES	246
9.0	CONCLUSIONES GENERALES	248
	CAPÍTULO X BIBLIOGRAFÍA.	252
10.0	BIBLIOGRAFÍA.	254
11.0	ANEXOS	288

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN GENERAL

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1. INTRODUCCIÓN.

Los ecosistemas dunares tienen la característica de ser uno de los ambientes más frágiles, y con la mayor posibilidad de sufrir una interacción que derive en la alteración de su dinámica litoral, en los que cobran notable protagonismo las acciones humanas, como modificadores de su evolución (Nordstrom, 1994). Ante las numerosas alteraciones sufridas, estos espacios han tenido una importancia progresiva en los últimos años en cuanto a iniciativas por resguardar sus valores (Paskoff, 1993).

Servera (1997) es quien inicia los estudios descriptivos de ambientes dunares a mediados del siglo XX. Investigaciones que se concentraron en dos grandes campos: por una parte, el relativo a los sistemas dunares y, por otro, los estudios de dinámica litoral. Por tanto son dos situaciones que se deben entender como complementarios (Paskoff, 1993; Bauer y Sherman, 1999), correspondiendo el primero de ellos a un análisis físico, mientras el segundo es más descriptivo y general.

La primera situación, está relacionada con el estudio de fenómenos dinámicos a través del análisis de variaciones de los elementos y procesos que forman el sistema litoral. Dicho estudio se concentra en los estudios de los flujos sedimentarios, usando métodos cuantitativos, aplicando modelos paramétricos y físicos. A principios de los años 30 se muestra el primer avance científico proveniente de R. A Bagnold (Bagnold, 1941) quien aporta los mecanismos de transporte eólico (Pye y Tsoar, 1990; Bauer y Sherman, 1999). Estos valiosos aportes terminan por generar la ecuación de la erosión eólica.

La segunda pauta marcada, más clásica, se relaciona con la geomorfología litoral. El fin que persigue esta tendencia es conocer la evolución de un sistema y poder así explorar los resultados (Paskoff, 1993). Para otros autores como Bauer y Sherman (1999) el estudio de ambientes eólicos tiene un carácter holístico y construccionista y tienen como objetivo conocer el comportamiento de estos ecosistemas.

Sin embargo en España, el interés por los sistemas dunares litorales es más tardío, pues comienza a partir de los años 60 (Servera, 1997), teniendo los mejores resultados el

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

campo de la vegetación, seguidos por el estudio de la dinámica y las geoformas y, por último los estudios sedimentológicos.

La génesis de los sistemas dunares litorales se relaciona con procesos post-glaciares y con los cambios holocenos en el nivel del mar. En consecuencia, en ellos se puede distinguir espacios de dunas superpuestos, sistemas estables y sistemas desestabilizados como resultado de la interacción humana y los cambios globales (Thomas, 1999). Por tanto, el equilibrio se encuentra caracterizado por la presencia de un gran volumen de arena que es transportada por las corrientes marinas y el oleaje hasta las playas, donde los sedimentos se secan y pueden ser movilizados por los vientos perpendiculares a la costa.

El funcionamiento de un ecosistema dunar no depende exclusivamente de factores naturales (Hernández, 2002). Al contrario, el funcionamiento de estos esta condicionado por la existencia de otros factores como la humedad ambiental, la pendiente topográfica, el relieve, actividad antrópica, humedad del suelo y la vegetación. Esta última desempeña un papel importante en la estabilización del sistema, al poner freno a los granos de arena. Así mismo la distribución de la vegetación suele responder a un modelo caracterizado por la presencia de especies psamófilas y halonitrófilas en los primeros ambientes, cercanos a las líneas de costa (Davies, 1980). Estas especies vegetales que requieren continuos aportes de arenas, muestran buena adaptación al sustrato móvil donde de ubican, bien sea presentando el sistema radicular vertical profundo, permitiendo llegar a la capa freática, pero también es posible encontrar especies con raíces superficiales que les permite aprovechar la humedad ambiental (Paskoff, 1998).

Una de las fuentes de agua para las especies que crecen en estos ambientes es la lluvia (Ranwell, 1972), pero en general debido a las características de los suelos, hay una baja capacidad de retención limitando su aprovechamiento. Esto implica que, la vegetación este sujeta a una cierta escasez durante todo el año, y aún más, en temporadas estivales (Crawford, 1989). Además de la precipitación existen otros aportes de agua para las plantas:

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

a) Por un lado, la proximidad de las dunas con el mar, junto con la naturaleza porosa del sustrato se combina para producir la condensación del rocío que ha sido estimada en 0.9 ml por cada 100ml de arena, en cada noche (Pavlik, 1984; Crawford, 1989), lo cual puede considerarse como una fuente importante de humedad para la vegetación.

b) Dada la gran movilidad del sustrato, las dunas costeras se caracterizan por tener una topografía particular, en la cual se pueden observar cimas, hondonadas y variaciones importantes de pendientes. De esta manera las condiciones abióticas y bióticas son diferentes en cada microambiente. En las zonas inundables, el manto freático puede estar a 3 ó 4 metros de profundidad (Moreno-Casasola, 1982), sin embargo en el ecosistema de Guardamar del Segura lo podemos encontrar a 2 metros durante la época estival.

Dos aspectos interesantes de analizar en estos ambientes lo constituyen por una parte el sistema radicular de las dos especies arbóreas (*Pinus pinea* L y *Pinus halepensis* Miller) dominantes del ecosistema dunar de Guardamar del Segura y por otra el agua del suelo. En otros términos, el punto en cuestión es conocer la distribución y profundidad que alcanzan las raíces y el agua en este ecosistema y su relación entre estas, para ello hemos empleado dos técnicas geofísicas como los sondeos eléctricos verticales (S.E.V) y el Ground Penetration Radar (G.P.R).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Los S.E.V es una técnica que consiste en introducir corriente directa al suelo y medir caídas de potencial en la superficie. Este método suministra una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo, permitiendo determinar la distribución vertical de las resistividades, las cuales en un momento dado se pueden asociar al contenido de humedad.

El G.P.R es un sistema basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en el suelo y capaz de producir una imagen (radargrama) de los elementos que hay bajo el mismo, es una técnica que se utiliza en investigaciones poco profundas. El empleo del georradar se ha popularizado a partir de los años 70 cuando aparecen publicados los primeros trabajos en minería y geología (Annan y Davis, 1976; Rubin y Fowler, 1977). Sobre los años 80 y 90 esta técnica adquiere mayor relevancia en estudios medioambientales y de arqueología (Ulriksen, 1982 y Glover, 1987, Goodman, 1994;

Carcione, 1996; Pérez-Gracia *et al*., 2000). A partir del año 1999 se inician las aplicaciones de esta técnica en el campo de la ecología, investigadores como Hruska *et al.* 1999, hacen un análisis de las raíces de la especie *Quercus petraea (Mattuschka) Liebl*. y Butnor *et al*., 2001, indaga sobre el sistema radicular de pino (*Pinus taeda* L.).

Comúnmente desarrollar investigaciones del sistema radicular por métodos tradicionales implica utilizar técnicas destructivas y bastante laboriosas, estudios que en muchos casos ocasionan impactos ambientales considerables en cualquier ecosistema y más en sistemas frágiles como los dunares. En nuestro estudio presentamos y desarrollamos una metodología (G.P.R) para el estudio de las raíces de especies arbóreas, técnica compatible con el medio dunar.

Los resultados obtenidos en esta investigación usando este tipo de tecnologías (G.P.R) no invasivas-no destructivas, aportaran información sobre la distribución y profundidad que alcanzan las raíces en este medio natural. Incluso, esta información puede servir a futuro para estimar la biomasa subterránea, permitiendo ahorrar una gran cantidad de tiempo, esfuerzo e incluso dinero.

En un ecosistema la entrada y salida de nutrientes son una pequeña fracción respecto a los que circulan internamente (Chapin *et al*., 2002), el agua juega un papel importante en el transporte y los nutrientes disueltos, determinantes en la capacidad productiva de los sistemas. En consecuencia, la dinámica de nutrientes esta intrínsecamente relacionada a los flujos hídricos del ecosistema. Muchos de los nutrientes entran por vía atmosférica y son trasportados de un compartimiento a otro en el bosque por el agua. Analizando la composición química del agua entrante (precipitación), la del lavado de la copa de los árboles (trascolación) y la que escurre por las ramas y tronco hasta llegar al suelo (escorrentía cortical) se determinan algunas de las entradas de nutrientes del ecosistema. El agua que llega al suelo por estos dos últimos flujos tiene una composición química diferente a la de la lluvia, nutrientes que pueden ser absorbidos o no por las plantas (Terradas, 2001; Rodrigo *et al.,* 2001).

Sin duda alguna cuantificar la contribución de los nutrientes que llegan por los flujos hídricos (precipitación, trascolación y escorrentía cortical) al ecosistema es fundamental, pues para algunos sistemas los aportes son vitales para su funcionamiento

(Gorham 1958), hasta tal punto que en algunas zonas áridas solo es posible el desarrollo de algunas especies gracias a las entradas por la deposición seca o por simple intercambio gaseoso entre las especies vegetales y la atmósfera circundante (Sarmiento 1984).

En ambientes mediterráneos españoles el estudio de nutrientes por medio de la precipitación global, trascolación y escorrentía cortical los inicia Rodà (1983) en sus estudios biogeoquímicos de la lluvia en algunos ecosistemas forestales del Montseny, luego Bellot y Escarré (1989) y Bellot (1989) hacen un análisis de los flujos hídricos en la vegetación en la sierra de Prades Tarragona, seguidamente Lledó (1990) analiza los flujos biogeoquímicos en el encinar del Monte Poblet, en este mismo año J. Piñol (1990) profundiza sobre el comportamiento hidrológico y biogeoquímico de las cuencas de L'Avic y La Teula, Domingo (1991) indaga sobre el papel de la cubierta vegetal en el aporte de nutrientes en un ecosistema reforestado con coníferas, estudio desarrollado en la sierra de los Filabres, Almería y Carratalá (1993) hace la caracterización de la precipitación de la Comunidad Valenciana.

Recientemente se han estudiado los efectos de la interacción de la lluvia con la superficie foliar de la vegetación (Andersen *et al*., 1993; Lin *et al* 2000; Gonzáles *et al.*, 2000; Rodrigo *et al*., 2001 entre otros).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En este trabajo se comparó la composición química de algunos nutrientes del agua de lluvia antes de cruzar y después de atravesar las copas de las dos especies arbóreas (*Pinus pinea* L y *Pinus halepensis* Miller) en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura y sus diferencias. Asimismo se estiman los enriquecimientos de algunos iones disueltos en el agua al pasar la vegetación.

1.1 ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ECOSISTEMAS DUNARES.

Las dunas costeras, ecosistemas con un alto valor ambiental en donde se desarrollan comunidades tanto animales como vegetales específicas de estos medios, se sitúan entre dos grandes sistemas de la biosfera: los continentes y los océanos. Se localizan en la parte continental de la playa y desempeñan una función clave en el litoral: los vientos y el oleaje influyen en el proceso dinámico por el que se origina el sistema dunar, siendo

la arena que arrastra el agua de las playas la que permite su formación (Packham y Wills 1997). Los vientos procedentes del mar, aportan aerosoles salinos que alcanzan las zonas más cercanas, además el viento es el responsable del transporte de las partículas de arena. Para que el viento pueda empujar las partículas de arena de un diámetro medio (1mm) necesita una velocidad mínima de 400 cm/s (Barbour *et al.,* 1985), y si se trata de arena de 0.1 mm de diámetro es necesaria una corriente de 90-150 cm/s para su transporte (Packham y Willis 1997).

Geomorfológicamente las dunas son estructuras que se asocian fundamentalmente a costas disipativas, dominadas por vientos marinos, y con elevada disponibilidad de sedimentos arenosos (Carter, 1995). Algunos ejemplos más sobresalientes de ecosistemas dunares se localizan en los márgenes terrestres de cuencas oceánicas, del sureste australiano (Thom, 1978), el Oeste de Escocia o el este de Irlanda (Quinn, 1977) entre otros. Sin embargo, estos depósitos eólicos pueden localizarse asociados a grandes depósitos glaciares, como los de Holanda (Jelgersma *et al* 1970), Polonia (Borowka, 1980) o los de la zona ártica canadiense (Bliss, 1993); a orillas de lagos continentales, como por ejemplo los sistemas dunares de los grandes lagos en EE.UU. y Canadá (Marsh, 1990) o asociados a la desembocadura de los grandes ríos.

Una de las características del sistema dunar son sus suelos, pobres en nutrientes y baja capacidad de retención de agua (Oosting, 1954; Salisbury, 1952; Barbour *et al.,* 1985; Martín e*t al.,* 1989), esta variable está influenciada por su particular granulometría o el contenido de materia orgánica (Glopper, 1964; Ranwell 1972), la movilidad de la arena (Salisbury, 1952), temperaturas variables (Willis *et al.,* 1959) y la edad de las dunas (Salisbury, 1952).

Una segunda característica de este tipo de ecosistemas es la escasez de nutrientes (Willis y Yemm, 1961; Willis, 1963 y 1965; Onyekwelu 1972a y 1972b), sobre todo de elementos como el nitrógeno y fósforo (Koerselman, 1992). Autores como Lammert y Grootjans (1997) han observado que el porcentaje de nitrógeno oscila entre 0.01-0.33% y entre 0.009-0.059% el del fósforo.

Una tercera característica de sistemas dunares es la salinidad, la cual esta relacionada con la capilaridad de las arenas, dado que el agua es uno de los factores implicados

directamente en el transporte, en las depresiones interdunares, se torna muy salina por evaporación y se forman evaporitas, con estructuras caracterizadas por la presencia de costras salinas (Tsoar, 1989). Para los suelos de costa el mar supone una fuente de sal inagotable, produciéndose el aporte de varias maneras: la primera la "sal cíclica" proveniente del aerosol marino; Una segunda que implican aportes más directos tanto por las aguas superficiales como las subterráneas.

1.2 SISTEMAS DUNARES COSTEROS DE ESPAÑA.

Las dunas costeras están ampliamente representadas en la Península Ibérica. La actividad humana ha influido en gran medida en el desarrollo y la conservación de estas formaciones litorales dado que actualmente, casi la mitad de las dunas costeras españolas se encuentran sometidas a degradación y en muchos casos han desaparecido, escapándose a esta presión, conservándose algunas zonas como la de Marbella (Málaga), las dunas de Guardamar del Segura (Alicante), el Sabinal (Almería), el parque natural Delta del Ebro y las dunas de Albufera en Valencia.

Andalucía es una de las regiones de La Península Ibérica con más frente de costa: alrededor de 1000 kilómetros. De todo este litoral una parte considerable está constituida por costas arenosas, donde están presentes diferentes tipos de formaciones dunares siendo la más sobresaliente las formaciones dunares de la comarca de Doñana. Entre Matalascañas y Mazagón se localizan por ejemplo las Dunas Fósiles del Asperillo que desde 1989 forman parte del Parque Natural de Doñana. Se trata de un complejo de antiguas dunas litorales hoy inactivas porque su elevación tectónica impide nuevos aportes de arena. Sobre la playa actual se ha formado un acantilado de hasta 100 metros de cota que, dentro de su tipología, es el más alto de Europa. Las dunas estabilizadas se identifican en Doñana con el nombre de monte blanco y monte negro.

En la Comunidad Valenciana, Según Costa *et al.,* (1989) el 95% de estos sistemas están alterados, y los que mejor se conservan desde el punto de vista geomorfológico y ecológico son el Parelló-Palmares y L´Altet (Sanjaume y Pardo 1992). En la provincia de Alicante han desaparecido cerca del 20% de las dunas entre 1956 y 1984 (Aldaguer y Seva 1989) y en Castellón algunas áreas necesitan protegerse debido a que están

sometidas a fuertes presiones antrópicas (Gómez *et al.*, 1998). El sistema dunar de Guardamar y Elche, es uno de los paisajes de mayor singularidad del litoral de la provincia de Alicante. La combinación de oleaje, dinámica marina y vientos facilitaron el origen de este cordón dunar. El incremento de aportes sedimentarios del Segura a partir del siglo XVII, justifica, en gran medida, el desmesurado crecimiento de las dunas de Guardamar. Evidentemente este ecosistema dunar es el fruto de una actuación humana, donde la mano del hombre ha tratado de compensar las nefastas actuaciones que en la cuenca alta y media del río Segura fueron el origen de la problemática y obligó a repoblar los arenales de Guardamar y Elche. En Valencia encontramos las dunas de La Albufera, uno de los sistemas más importantes dentro de la comunidad y donde se han realizado proyectos pioneros de restauración a nivel europeo.

En el parque natural del delta de Ebro se distingue una superficie de arena completamente llana y lineal, de la que sólo sobresale el cordón de dunas móviles que componen uno de los sistemas dunares mejor conservados del litoral ibérico. Las dunas de la costa mediterránea española son un hábitat adecuado para numerosos endemismos (Asensi y Diez 1993), algunos autores afirman que sus comunidades vegetales son las más ricas en especies y diferenciadas florísticamente que las de otros territorios (Knapp 1973, Gehu 1986).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Los ecosistemas dunares de la costa mediterránea Ibérica, se encuentran en un amplio rango latitudinal, que favorece la diferenciación según su precipitación, encontrándose estos sistemas en zonas con niveles de precipitación de alrededor de 400 mm al año, como La Albufera de Valencia o el delta del Ebro, y zonas como Guardamar en donde escasamente se alcanzan los 300 mm al año.

En España la presión humana sobre los ecosistemas dunares se ha incrementado en los últimos 100 años. Como consecuencia de esta intervención se han visto alterados en mayor o menor medida la abundancia de especies y los procesos ecológicos (Gallego *et al.*, 2003).

1.3 EL ECOSISTEMA DUNAR DE GUARDAMAR DEL SEGURA.

1.3.1 Repoblaciones.

A finales del siglo XIX y principios del XX, se ejecutó un ambicioso proyecto de fijación de las dunas, puesto que su avance hacía peligrar cultivos y viviendas. Las dunas avanzaban de 3 a 8 metros al año. Ante la alta movilidad de las arenas y lo que ésto suponía para la población, en el año 1897 comenzaron las tareas de fijación, empezando por una franja situada en la margen derecha del río Segura, por ser un riesgo inminente sobre la zona urbana y la huerta próxima. La plantación de pinos de las dunas se hizo bajo la dirección de D. Francisco Mira, quien se fijó dos objetivos: detener en la playa la arena arrojada por el mar y segundo fijar toda la extensión cubierta por las finísimas arenas. Para cumplir su primer objetivo comenzó construyendo una empalizada de 1,80 cm de alto (Figura 1 y 2). A medida que las arenas lo enterraban, se recrecían con otros nuevos. Cuando esta contraduna alcanzó 4 m de altura, planto en la cresta del malecón ágabes americanos sustituyendo a los cañizos. Estas piteras iban creciendo al mismo compás que crecía la duna y a su vez se iban plantando en las vertientes, barrón y matacuchillo (*messembryanthenu*). Con ello quedó detenida y fijada toda la arena. El segundo objetivo propuesto por Mira y que comprendía las zonas de litoral de Guardamar y Elche con un área aproximada de 900 hectáreas las repobló con 600.000 pinos, 40.000 palmeras y 5.000 eucaliptos. Adicionalmente se construyeron 8 Km de caminos, 14 Km de contraduna, tres viveros de donde salieron todas las plantas de la repoblación (Mira, 1906).

En la actualidad el ecosistema presenta un amplio dominio por las especies de estrato arbóreo siendo sus principales representantes el pino piñonero y el pino halepo fruto de la restauración. Además existe un claro predominio de plantas herbáceas como *Teucrium capitatum*, *Thymus vulgaris* y *Fagonia cretica*. En los claros además de los géneros ya mencionados se pueden observar *Asparagus acutifolius*, *Asphodelus fistolosus*, *Sideritis leucantha*, *Hordeum murimum* y *Brachypodium retusum.*

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 1. Fijación de las dunas mediante tablestacado.

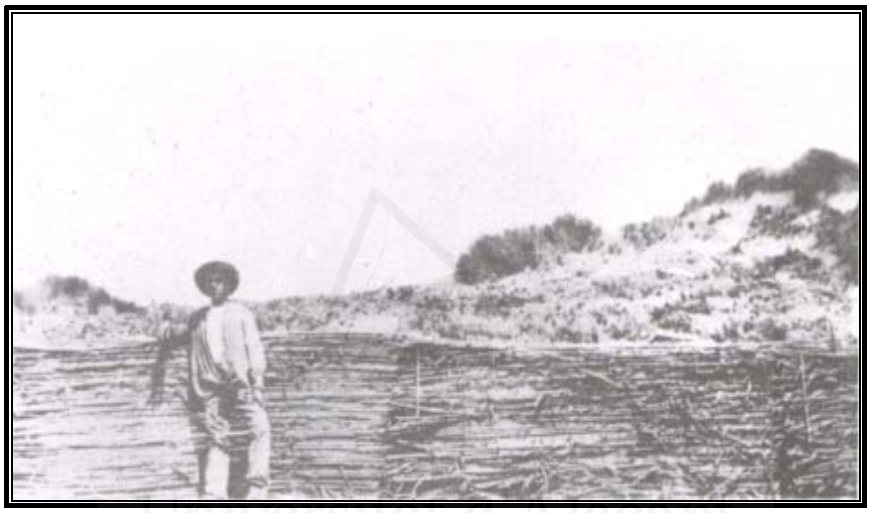


Figura 2. Fijación de las dunas mediante cañizo.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.3.2 Situación actual.

Las dunas de Guardamar por su alto valor paisajístico se constituyen hoy día en una de las principales fuentes de ingreso económico para el municipio y sus pobladores, puesto que es todo un atractivo turístico. Por lo tanto la fórmula del ecoturismo encuentra aquí un prototipo que no admite comparación, dado la riqueza medioambiental de una villa que cuenta con playas protegidas de inusual longitud, rodeadas de una gran extensión de dunas y pinar. Todo este creciente y constante movimiento de personas y de vehículos provocan profundas alteraciones en su morfología. Así, buena parte de la vegetación asociada a las dunas de este espacio ha sufrido las consecuencias de esta importante presión llegando en algunas zonas prácticamente a desaparecer, también ha contribuido

a la degradación, la proliferación de especies ruderales y el descenso de la vegetación arbórea (Laguna, 1996).

Por otra parte el incremento de plagas como los escolítidos, ha tenido como consecuencia la eliminación de varios miles de pinos en la década de los 90 (Bernabé, 2004). También, hay un 40% de árboles que presentan algún grado de defoliación (Grass *et al.,* 2000), posiblemente debido a la contaminación del aerosol marino cargado de surfactantes ya detectados en agua del mar y en captadores de precipitación horizontal (Carratalá *et al*., 2003). En este mismo ecosistema Raventós *et al.*, (2001) han realizado trabajos dendrocronológicos en los que se ha observado tanto en *Pinus halepensis* Miller como en *Pinus pinea* L con distintos grados de defoliación, que los pinos no presentan ningún anillo en la ultima década. Estos autores explicaron que esta diferencia probablemente es debida a la disponibilidad hídrica, mayor en las primeras décadas por aportes del río Segura, pero escasa en los últimos años por la demanda de actividades humanas. En este mismo pinar Garcia, (2005) realizó un cálculo de entradas y salidas de agua para el año hidrológico 2002-2003. Este autor concluye que hay un saldo negativo de agua del orden de 28,2 mm. Conocedores de todos estos problemas que presenta la pinada y conscientes de la importancia que representa este medio natural, queremos contribuir con aportes científicos generados durante más de tres años de investigación, aportes que ayudarán a conocer más y mejor el funcionamiento del ecosistema.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.3.3 Estudios llevados a cabo en la zona en los últimos años.

En este peculiar ecosistema desde hace varios años trabaja un nutrido grupo de científicos quienes profundizan en el funcionamiento y problemática del ecosistema. A continuación daremos a conocer algunos de los trabajos más relevantes.

Martín *et al.,* (1989) hacen una caracterización de las granulometrías de la arena a diferentes profundidades (10, 20 y 40 cm) en un muestreo a lo largo de la costa, estos observaron que en sistema dunar de Guardamar del Segura predominan bajos porcentajes de arcilla y limos. Respecto a los nutrientes estos investigadores destacan la asociación de los nutrientes (nitrógeno, sodio y potasio) con al fracción más fina formada por limos y arcillas. Con relación a las temperaturas, el sustrato ha llegado a

alcanzar hasta los 46 ºC en verano, descendiendo apreciablemente durante la noche, así mismo señalan que ésta varía notablemente a diferentes profundidades. En este mismo año Aldeguer y Seva (1989) hacen importantes apreciaciones sobre las agresiones a las que se ve sometido el medio dunar, así mismo realizan una propuesta de ordenación.

A partir del año 1996 se iniciaron trabajos de colaboración entre el departamento de ecología de la Universidad de Alicante, la Conselleria de Medio Ambiente de la Comunidad Valenciana y el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), encaminados a la restauración de la cubierta vegetal. Se realizaron experiencias con plantaciones arbustivas y arbóreas dentro de la masa forestal, en donde se utilizaron nueve especies con sustratos diferentes, y dos niveles de radiación (dentro y fuera del pinar). Los resultados mostrados por Escarré *et al*., (2004) al cabo de 27 meses de la plantación indicaron que la supervivencia fue del 36%, con un rango de valores que oscila entre el 3% de *Rhamnus lycioides* L al sol y sobre arena hasta el 93% de *Myoporum tenuifolium* G. En 1997 estos mismos investigadores efectuaron una segunda plantación pero esta vez ubicando cada planton en el tipo de radiación adecuado para su especie y en el sustrato más favorable de los estudiados. Se observó que la supervivencia ascendía al 41% y la *Pistacia lentiscus., Pinus pinea* L y *Pinus halepensis* Miller habían superado los valores de supervivencia obtenidos anteriormente llegando a ser del orden de 68%, 63% y 50% respectivamente. La ultima experiencia realizada en el sotobosque de la pinada y utilizando especies como *Juniperus phoenica ssp, Turbinata* (Guss) Nyman, *Juniperus oxycedrus subsp, Pistacia lentiscus* L., *Phillyrea angustifolia* L., *Pinus pinea* L., *Tetraclines articulata (Vahl), Pinus halepensis* Miller y *Tamaris gallica* L., se efectuó en el año 2000. Los resultados obtenidos por este grupo de investigación no han sido tan alentadores pues las escasas precipitaciones provocaron una alta mortalidad en los individuos (Jiménez-Ortiz 2001).

También en este año se realiza una tesis de licenciatura titulada "Utilización de *Pistacia lentiscus* L. en la recuperación de la cubierta vegetal", estudio encaminado a conocer el comportamiento de esta especie en estos ambientes (Jiménez-Ortiz 2001).

Recientemente se han leído dos tesis doctórales. La primera, Bernabé (2004) "Caracterización de las plantas psamófitas, aproximación a sus tipos funcionales, y ensayos de restauración en las dunas del litoral alicantino", investigación que permitió

caracterizar un total de 18 especies basándose en casi 50 variables, de igual manera cuantificó los recursos más limitantes en este tipo de ambientes. La segunda titulada "Balances de agua y carbono en un ecosistema mediterráneo de costa" desarrollada por Garcia (2005), en los que trata tres interesantes temas: En primer lugar aborda las variaciones del índice de área foliar del pinar, seguidamente determina las entradas y salidas de agua y por ultimo observa la variabilidad temporal y espacial del ciclo de carbono.

1.4 PLAN DE TESIS.

La estructura planteada en esta tesis obedece al desarrollo de los diferentes temas investigados. Se empieza por establecer una introducción con las investigaciones más importantes recopiladas en la bibliografía publicada preferiblemente en los últimos años. Luego se plantean los objetivos e hipótesis.

Capítulo 2. En éste se ofrece una descripción general de la zona de estudio. En él, se detallan características climáticas, geológicas, edáficas, hidrogeológicas y de vegetación.

Capítulo 3. En éste se establece la importancia que tiene el agua como componente esencial y de transporte de sustancias en un ecosistema, También se plantea el porqué de estudiar la química de la precipitación. Se presentan los resultados y se hace especial hincapié en caracterizar la procedencia de los iones.

Capítulo 4. Que trata todo lo referente al flujo de la trascolación, partiendo de los trabajos más relevantes que se han desarrollado y de la importancia que tiene este como medio de transporte y enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema.

Capítulo 5. En el que se trata todo lo referente al flujo de la escorrentía cortical, siendo ésta una vía de aportes y de modificación de nutrientes en un ecosistema. Al igual que los capítulos anteriores hicimos una revisión bibliografica de los trabajos más importantes desarrollados.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Capítulo 6. Se parte matizando la importancia que tiene el suelo como base fundamental de sostenibilidad de la masa forestal, y que influye tanto en el almacenamiento de agua como de nutrientes. También se describe ampliamente los fundamentos de dos métodos (mecánicos y eléctricos) empleados en el estudio del agua en el subsuelo. También presentamos todo lo referente al monitoreo de las características químicas y evolución del nivel freático en todo el periodo de estudio. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la distribución vertical de la humedad en el suelo.

Capítulo 7. Este nos ofrece en primer lugar una revisión bibliografica de las aplicaciones de la técnica "Ground Penetration Radar" (GPR) en diferentes áreas. Seguidamente se describen, tanto los fundamentos de esta técnica, como los parámetros a tener en cuenta en la toma de datos. Posteriormente se detalla paso a paso la metodología empleada en la adquisición de datos de GPR. Por ultimo se presentan los resultados obtenidos con las diferentes antenas sobre la distribución del sistema radicular de las dos especies en el suelo dunar.

Capítulo 8. En este capítulo se integran los aspectos más relevantes de los apartados III, IV, V, VI y VII de esta tesis, con el objetivo de discernir sobre los flujos y nutrientes que llegan al ecosistema dunar, también se estiman los aportes que recibe el medio dunar.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.5 OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO.

Nuestros objetivos del trabajo se centraron en primer lugar en conocer la dinámica de algunos iones presentes en el agua de la precipitación, trascolación y escorrentía cortical. En segundo lugar se pretendía conocer la distribución vertical del contenido de humedad y calidad del agua en el suelo y por último evaluar la utilidad del Ground Penetration Radar (GPR) en el estudio del sistema radicular de las dos especies arbóreas dominantes en el sistema dunar.

1.6 HIPOTESIS.

1 El dosel del monte dunas de Guardamar de Segura juega un papel importante en la captación de nutrientes, puesto que este actúa como un filtro de las deposiciones seca y húmeda. Estos nutrientes se almacenan en las especies (en nuestro caso *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L) y cuando ocurren precipitaciones el agua realiza un lavado en hojas y tronco alterando la química del agua incidente. Por lo tanto si conocemos las características químicas de precipitación, escorrentía cortical y trascolación, podremos estimar las tasas de enriquecimiento y saber si estas especies ceden o absorben nutrientes.

2 En sistemas tan peculiares como las dunas costeras el agua necesaria para la vegetación tiene diferentes procedencias: una de ellas es la precipitación, otra el rocío y el agua freática. Las especies arbóreas (*Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L) de las dunas de Guardamar del Segura deben utilizar fundamentalmente los aportes de las precipitaciones y el rocío para sobrevivir.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO II
ÁREA DE ESTUDIO

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN.

El estudio se realizo en el pinar de Guardamar de la Segura (38º 06.128’ N y 0º 38.965’ W), a 45 Km al SE de la ciudad de Alicante, en el municipio del mismo nombre. El sistema dunar estudiado ocupa a lo largo de la costa del Mediterráneo, una faja de unos 13 Km. y que alcanza entre 500 y algo más de 1000 metros de ancho, con alturas de hasta 15 m. El área total del ecosistema dunar son unas 900 hectáreas aproximadamente (Aldeguer, 1989) figura 3.

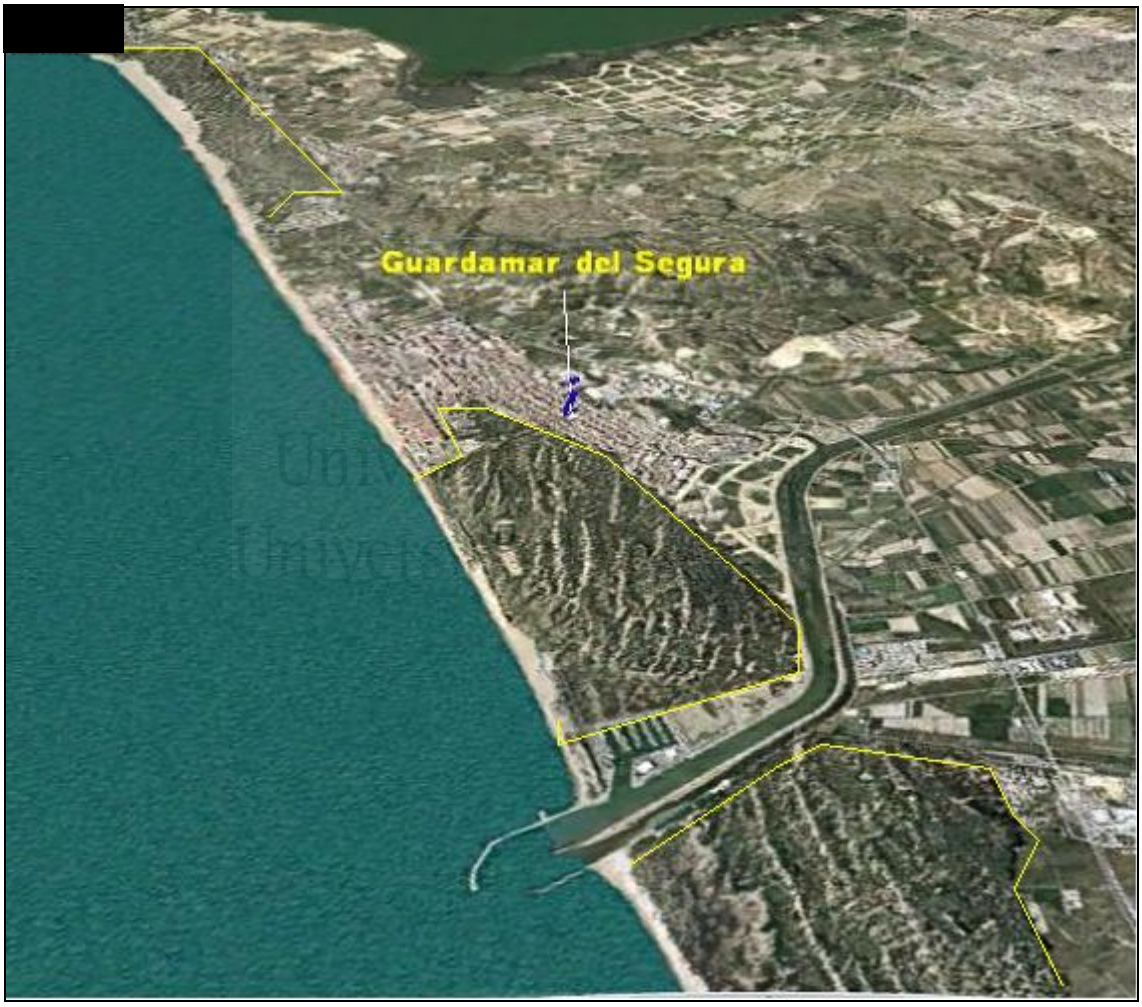


Figura 3. Fotografía aérea de la zona de estudio.

2.2 CLIMA.

Según Pérez-Cueva, (1994), basándose en los datos del período 1961-1990, el área de estudio pertenece a un clima del sector litoral mediterráneo, en el parte más árida de la Comunidad Valenciana, clasificada como semiárida y mesotérmica, con una precipitación promedio anual de 312 mm, siendo el mes más lluvioso octubre y el más seco julio (Figura 4), con una evapotranspiración potencial anual de 870 mm (índices calculados por método de Thornthwaite).

La principal característica pluviométrica está marcada por una importante sequía estival en los meses de julio y agosto (3,2 y 5,8 mm). Siendo el otoño donde se observan los mayores picos de precipitación (120,8 mm).

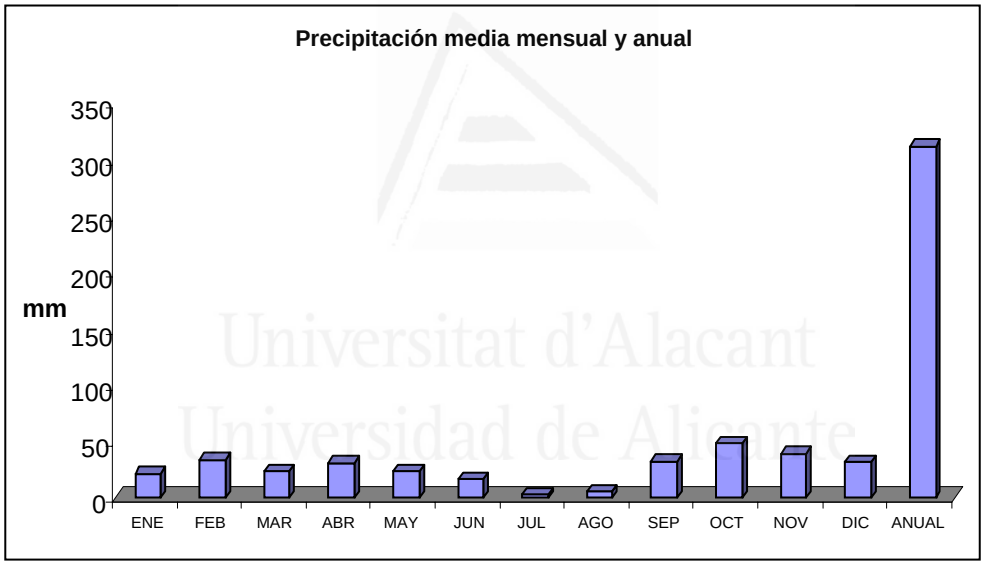


Figura 4. Precipitación media mensual y anual en el periodo 1961-1990

La temperatura media anual máxima de Guardamar de Segura es de 17, 5 ºC, con un invierno suave (enero 11,5ºC y diciembre 12,3ºC) y un verano marcado por altas temperaturas (40ºC en agosto).

Respecto a la distribución de frecuencias de la dirección del viento, destaca su estacionalidad, ya que en primavera y verano predominan los vientos del este, mientras que en otoño e invierno lo hacen los del Oeste y Noroeste.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.3 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.

Los cordones de dunas litorales son sedimentos que aparecen bien representados a lo largo de la costa sur de Alicante, en relación con las situaciones de máximo avance del mar en los periodos interglaciares cuaternarios (Estévez y Pina, 1989). Estos autores dividen el litoral meridional alicantino en cuatro sectores, que son: Alicante-Santa Pola, Salinas de Santa Pola, La Marina-Guardamar, y la Mata-Torrevieja.

En el sector de La Marina-Guardamar, la duna actual que cubre a una fósil, comenzó su desarrollo durante la regresión würmense y transgresión holocena. Su cuerpo sedimentario duna-playa se apoya sobre un conglomerado continental de restos de vertebrados (Montenant, 1973), y presenta afloramientos importantes de playas paleotirrenses acompañadas de algunos depósitos dunares.

El río Segura, es el principal responsable del aporte de sedimentos de la formación dunar. Sanjaume y Pardo (1992) indican que las procedencias de los materiales aluviales son: la erosión de los acantilados, el viento, la destrucción de formaciones relictas y los sedimentos detríticos de origen orgánico, procedentes de la plataforma continental inmediata. En este sector, la denudación de acantilados es irrelevante debido a la ausencia de los mismos y los otros tres mecanismos están muy supeditados al aporte fluvial.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.4 SUELOS.

Desde el punto de vista edáfico, las dunas son suelos minerales brutos, escasamente evolucionados, carentes de complejo húmicoarcilloso y con un complejo absorbente casi inexistente compensando por la gran abundancia de minerales en vías de alteración, hecho acentuado en nuestra costa al tratarse de dunas calcáreas (Martín *et al*, 1989).

La intensa radiación solar que recibe este medio se concentra en el primer milímetro de la superficie aproximadamente (Tsoar, 1989). Esta energía se transmite a los estratos inferiores más fríos, aunque la baja conductividad térmica que presenta la arena sólo permite una penetración lenta del calor que contrasta con los cambios rápidos en superficie (Lascurain, 1987). En un registro térmico del suelo llevado a cabo por la

Conselleria del Medio Ambiente de la Comunidad Valenciana en los meses de mayo a agosto de 1997, a cuatro profundidades. Los suelos de esta zona registraron valores en el mes de agosto los picos máximos en superficie (51,4ºC), y mínimos en mayo a 5 cm de profundidad (23.4ºC) (Jiménez-Ortiz 2001).

2.5 HIDROGEOLOGÍA.

El término Guardamar del Segura se inserta dentro da la unidad hidrogeológica de Guadalentin-Segura, que se extiende desde Puerto de Lumbreras hasta la desembocadura del río Segura, la extensión total del sistema es de unos 470 km^2, de los cuales 285 corresponden a la Vega Baja km^2 rellena de materiales detríticos del Plio-Cuaternario.

El sistema acuífero de las Vega media y Baja del Segura esta constituido por gravas, gravillas y margas, con una distribución horizontal y vertical bastante heterogénea. En el caso de la Vega Baja, aguas abajo se dan dos acuíferos: uno libre o superficial, drenado por el río y los azarbes de Viñas, Mayayo y Riacho, entre otros, que desembocan en el río a poca distancia del mar y otro profundo, cautivo y de muy poco espesor, que corresponde a una interfase con aguas salobres y de mala calidad, dado que las actividades agrícolas contribuyen a empeorar éstas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Las perspectivas hidrogeológicas de la zona son muy limitadas como consecuencia de la sedimentación y por lo tanto de la naturaleza de las rocas que la componen. En términos generales puede afirmase que las formaciones neógenas carecen de permeabilidad, aunque su grado de porosidad sea aceptable. Solamente el plioceno transgresivo parece cumplir las mínimas exigencias impuestas por los condicionantes hidrogeológicos, si bien se trata de niveles poco potentes para acoger volúmenes de agua de cierta importancia. Por otra parte, la sucesión estratigráfica de niveles margosos hace que la permeabilidad vertical sea prácticamente nula y en consecuencia las áreas de alimentación sólo serán posibles en lugares donde afloren los mencionados niveles pliocenos con circulación lateral hacia las áreas deprimidas, siempre que tengan continuidad y no haya facies, tan frecuentes en la hoja de Guardamar.

2.6 VEGETACIÓN.

La vegetación del sistema dunar de Guardamar del Segura es único con relación al resto de la zona, distinguiéndose una mezcla de vegetación riparia, psamófila y halófila. Las especies psamofitas se sitúan en primera, segunda y las dunas fijas, localizadas en la desembocadura del río. En la primera línea de dunas móviles se desarrollan especies como: *Ammophila arenaria* Link, *Lotus creticus* (L) R. Br, *Sporobolus pungens (*Schreb) Kunth, *Cakile maritima* Scop, *Medicago marina* L, *Calystegia soldanella* L *y Polygonum maritimum* L. La vegetación riparia, se localiza en orillas del cauce del río Segura donde se han observado *Tamarix canariensis* W, *Phragmites australis* Cavis, *Scirpus maritimus* L, *Arundo donax* L, entre otras. En zonas alejadas del nivel del agua hay presencia de *Bidens tripartita* L, *Convolus sepium* L, *Trifolium sp.* Por último, sobre las dunas fijadas y sobre una duna fósil se sitúan especies del genero *Helianthemum*, *Fumana* y *Phagnalon*, así como una abundancia de *Limonium echiodes*.

La población vegetal característica en el pinar de Guardamar del Segura se puede resumir en la figura 5.

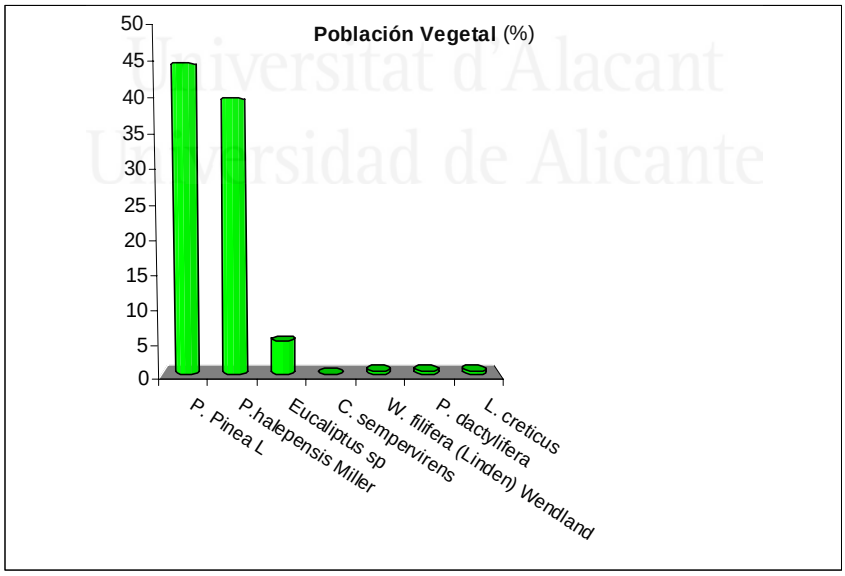
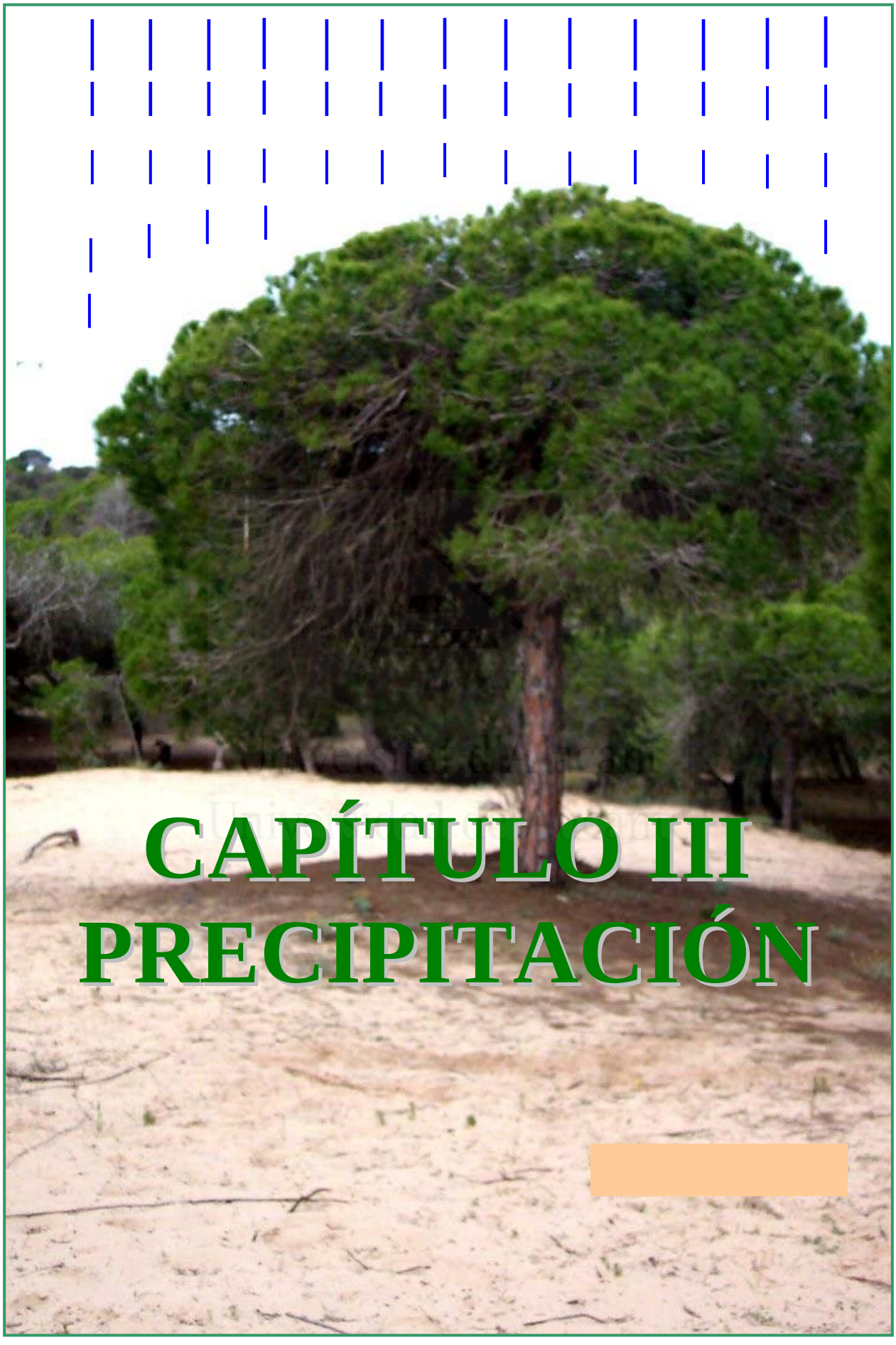


Figura 5. Valores porcentuales de la población vegetal de Guardamar del Segura basado en Seva, *et al*., 1989.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



CAPÍTULO III
PRECIPITACIÓN

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1 INTRODUCCIÓN.

Gran parte de la Comunidad valenciana presenta un clima semiárido con precipitaciones anuales entre 300 y 500 mm. El extremo Sur tiene una mayor aridez con precipitaciones por debajo de los 300 mm (Peñarrocha, 1994). En general esta zona de España presenta precipitaciones escasas, irregulares y sometidas a fuerte estacionalidad, así mismo el agua es el factor principal que controla el desarrollo del medio natural y humano (De Luís *et al.*, 2000). En estas condiciones es difıcil aceptar cualquier proyección en el futuro mas inmediato y con las debidas moderaciones, la evolución temporal parece dirigirse mas hacia el descenso de los totales anuales que hacia su incremento (Gonzáles *et al.*, 2002).

La fuente principal de agua para un bioma terrestre es la precipitación, tanto su cantidad anual como su distribución a lo largo del año determinan los patrones fenológicos y productivos del ecosistema. El patrón de humedad atmosférica, aunque de menor magnitud en términos de lo que representa la cantidad de agua que aporta al sistema, este juega un papel relevante al controlar las tasas y demandas de evapotranspiración por parte de la vegetación.

Garcia, 2005 ha estudiado los volúmenes de precipitación en Guardamar del Segura durante los periodos de noviembre 2001-septiembre 2002 y octubre 2002-agosto 2003, sin embargo nosotros hemos ampliado este estudio hasta diciembre de 2004 e introducimos un aspecto interesente, conocer la química de la lluvia en este ambiente dunar.

El estudio de la química de la precipitación es de interés para resolver muchos problemas ambientales que afectan a la gestión de ecosistemas terrestres. El conocimiento de su composición ayuda en cierto modo a evaluar el grado de contaminación atmosférica (Likens *et al*., 1979). Igualmente contribuye al estudio de la capacidad corrosiva del agua lluvia (Tamm y Cowling, 1977).

Como indica Meszaros (1981), la atmósfera es una reserva de gases que va cambiando su composición a lo largo del tiempo. Cada componente tiene un tiempo de residencia propio, por lo tanto algunos de estos permanecen durante eras geológicas sin embargo

otros no lo hacen. Fascina (1980), mostró ejemplos de procesos de cambio en la composición química de la atmósfera con base a material particulado recibido continuamente.

El estudio de la composición química del agua de lluvia tiene sus orígenes en la década de los 50 cuando Junge y Werby, 1958 ó Eriksson (1953), investigaron sobre los efectos de las precipitaciones ácidas en los ecosistemas. Estos autores observaron que el origen de los daños en el medio natural estaba ocasionado por emisiones de $S0_2$ y N0x. En los últimos años la mayor información ha sido reunida en Norte-América, centro y norte de Europa, y en otras zonas del mundo (Galloway *et al*., 1976; Granat, 1978). En el ámbito mediterráneo, Italia es el país donde se han llevado a cabo más investigaciones de composición química de la lluvia (Camuffo *et al*., 1991). En España un buen número de autores han estudiado la química de la precipitación (Rodà, 1983; Bellot y Escarré, 1988; Ezcurra, 1988; Domingo, 1991; Camarero y Catalán, 1993; Roda *et al*., 1993; Carratalá 1993; Ávila, 1996; Casado *et al*., 1996; Carratalá y Bellot, 1998; Ávila y Alarcón, 1999; Encinas y Casado, 1999; Gonzales *et al.*, 2000; entre otros). Además el estudio de los elementos químicos ha suscrito gran interés por dos motivos principales: 1) la precipitación se constituye en una vía de entrada de nutrientes relevantes en todo ciclo biogeoquímico de los ecosistemas terrestres y acuáticos (Likens *et al*., 1995; Hedin *et al*., 1995), y 2) La lluvia ácida provoca graves efectos sobre los biomas acuáticos y terrestres.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El contenido soluble y particulado de la precipitación dependen de la existencia de varios factores (fuentes de emisión en el recorrido de masas de aire, cantidad de lluvia, capacidad de las gotas para arrastrar ese material particulado, etc. La atmósfera contiene gases y partículas de origen natural o antrópico que, tras un tiempo de residencia se depositan en la superficie terrestre por medio de la lluvia bien sea seca o húmeda. La acidez de la lluvia depende de aportes provenientes de emisión de combustiones de hidrocarburos, procesos industriales, reacciones en el motor de explosión de vehículos. Las sustancias alcalinas neutralizantes pueden tener un origen antrópico, debido a actividades como las fábricas de cemento o centrales térmicas (Semb *et al*., 1995), pero la procedencia de fuentes naturales por como el polvo edáfico es muy superior en zonas áridas (Chester *et al*., 1996). Sin embargo las continuas modificaciones en el uso del suelo y las deforestaciones en África han aumentado considerablemente la procedencia

(Tegen y Fung, 1995), confundiendo la distinción entre el origen antrópico y natural de partículas alcalinas. Este material es transportado a grandes distancias por los vientos alisios hacia el Atlántico Norte (Prospero, 1996), América central y del Caribe (Prospero *et al*., 1987), y América del sur (Swap *et al*., 1992).

3.2 OBJETIVOS.

3.2.1 General.

Conocer la entrada de algunos nutrientes al ecosistema dunar de Guardamar del Segura por medio del estudio de la precipitación global.

3.2.2 Específicos.

- Estudiar los aportes de agua por la precipitación.
- Determinar la concentración de los iones calcio, magnesio, potasio, sodio cloruros, nitratos y sulfatos presentes en el agua de lluvia.
- Conocer la variabilidad temporal y el origen de los iones presentes en al agua de lluvia.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.3 MATERIAL Y METODOS.

3.3.1 Sitio de muestreo.

El sitio de muestreo escogido para la toma de alícuotas de agua de la precipitación, trascolación y escorrentía cortical, se localizó dentro de una parcela protegida por una malla, con una superficie aproximada de 4000 m^2 (Fig.6). Esta área esta ubicada en una depresión dunar en la parte central de la pinada, contigua al espacio donde se han desarrollado trabajos arqueológicos, a una distancia aproximada de 1,5 Km del término municipal de Guardamar del Segura.

Figura 6. Localización de la parcela donde se desarrollo la investigación.

3.3.2 Muestreo de la precipitación.

Para realizar el muestreo de la precipitación y la deposición global se usaron cuatro pluviómetros instalados en la parcela de estudio mediante el sistema recomendado por Galloway y Likens (1976). Cada colector (Fig. 7) constaba de un embudo de polietileno de 25 cm de diámetro, situado a 1,5 m de altura, unido también a un recipiente de polietileno de 6 litros. En el cuello de cada embudo se colocó una malla de 1mm de poro, para impedir el paso de insectos y material que pudieran caer en el interior del depósito.

Después de cada evento a cada colector se le midió el volumen en una probeta graduada, así mismo se recogían las alícuotas para el análisis químico, cuando estas eran insuficientes se mezclaban con el agua del pluviómetro más cercano. Para evitar posibles alteraciones de las muestras se recolectaban inmediatamente después de producirse cada lluvia, de igual manera se remplazaba el depósito colector por uno totalmente limpio y se realizaba la limpieza *in situ* de los materiales (embudo y tubo). No se coloco ningún tipo de conservante, puesto que autores como Galloway y Likens (1978) prueban que algunos biocidas alteran químicamente la muestra o actúan como interferencia en el proceso de análisis químico.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 7. Colectores de precipitación

3.3.3 Métodos de laboratorio.

Los métodos de laboratorio que a continuación describiremos fueron los utilizados para el análisis químico de las muestras de la deposición global, trascolación y escorrentía cortical.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.3.3.1 Medida del pH y la Conductividad.

El pH se determinó mediante un pHmetro Radiometer, modelo PHM-82 con compensación manual de temperatura. Tanto la calibración del pHmetro como la medida se realizaron con la muestra en agitación.

Con otra alícuota sin filtrar se determinaba la conductividad eléctrica mediante un conductivímetro Crison, modelo 525 de compensación automática de temperatura.

Inmediatamente después de realizar las medidas de pH y la conductividad, se procedía al filtrado de las mismas, para ello se usaron membranas Millipore de 0.45 µm de poro. Posteriormente se almacenaban las muestras a 4ºC hasta la determinación de cationes y aniones.

3.3.3.2 Análisis de los iones.

Los cationes calcio, magnesio, potasio y sodio se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica. El equipo utilizado fue el Perkin-Elmer 4300 DV, utilizando para la calibración de cada elemento 6 patrones mixtos con proporciones similares a las que aparecen en las muestras.

Los nitratos, cloruros y sulfatos se analizaron por cromatografía líquida en un cromatógrafo iónico Dionex, técnica descrita por Small *et al.*, (1975) y siguiendo los métodos estándar descritos en Official Methods of Analytical Chemistry (AOAC). Los patrones de calibración fueron mixtos que coincidían con los rangos de las muestras.

Hay que tener en cuenta que podría haber una contribución de material particulado procedente de África no contabilizada. De todos modos estos sucesos pueden corresponder solo a unos pocos eventos.

3.3.4 Métodos estadísticos.

En el análisis estadístico se aplico el software SPSS 12.0 de Microsoft Windows. Los diferentes apartados de este capítulo recibieron una exploración acorde con sus características. En todos los casos se comprobó la normalidad de los datos y la igualdad de las varianzas, luego se procedió a realizar ANOVAS para comparar medias.

Para ver diferencias significativas entre variables aplicamos el coeficiente de Pearson y la ANOVA. Ambos análisis enseñan las diferencias apreciadas entre las medias tomadas. En algunas de las comparaciones entre variables la nube de puntos se ajustó a una recta obteniéndose un valor de R^2 determinado a partir del cual se calcularon los coeficientes de correlación (r) correspondientes, si estos eran superiores que los esperados para el nivel de significación de 95% se asumían que las variables estaban bien correlacionadas.

La variabilidad interestacional fue analizada con el test de Fisher el cual permite conocer entre que factores o variables son significativas las diferencias encontradas en el ANOVA. El análisis se ha realizado con las concentraciones medias ponderadas por

el volumen de cada evento, de los colectores de deposición global instalados en el ecosistema.

También se hizo análisis factorial reduciendo el número de variables originales agrupándolas en pocas y nuevas variables (factores). Estos factores son originados para retener la máxima información original posible. Para conocer el origen de los iones se hizo un análisis de componentes principales (PCA), obteniendo un reparto de variables por factores (o ejes) más definido al efectuar un Análisis Factorial (FA), este rota en un número reducido de dimensiones.

Los procedimientos seguidos en el análisis factorial, reducen la matriz de correlaciones original de dimensiones i x i (i = nº de variables), a una matriz de n variables o factores, siendo n menor que i, que puede presentar un alto porcentaje de la varianza entre las muestras. De esta forma, cada observación pasa a ser representada en un espacio i-dimensional a serlo en un espacio n-dimensional. Cada uno permite identificar la naturaleza de los factores a través de los "*loadings*" o coeficientes de correlación entre las antiguas variables y los nuevos factores. Los cuadrados de estos coeficientes proporcionan la fracción de la varianza total que explica cada factor. A la hora de interpretar el sentido físico de un factor, generalmente se incluyen aquellas variables con mayor carga, excluyéndose el resto.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Dado que, matemáticamente, hay más de un conjunto de factores capaces de satisfacer ecuaciones propias del análisis factorial, existen diferentes criterios de rotación para la selección de los factores óptimos. El método de rotación ortogonal utilizado en esta investigación fue el de Varimax, que minimiza el número de variables que tienen saturaciones altas en cada factor.

3.4 RESULTADOS.

3.4.1 Volumen de la precipitación.

Se ha hecho un seguimiento desde enero de 2002 hasta diciembre de 2004, periodo en el cual se puede observar la gran variabilidad de los volúmenes de precipitación (figura 8). En el año 2002 la precipitación total fue de 248,65 mm, mientras que en el año 2003 se

registraron valores de 267,5 mm y en el 2004 se recogieron 334 mm. La mayor precipitación del primer y tercer año se registró en el mes de abril (104 mm) respectivamente), a diferencia del año 2003 que se registró en el mes de mayo (72,2 mm). Los meses de menor precipitación ha sido enero (7 mm), junio (4,5 mm) y septiembre (1,5 mm) en el año 2002 y en el 2003.

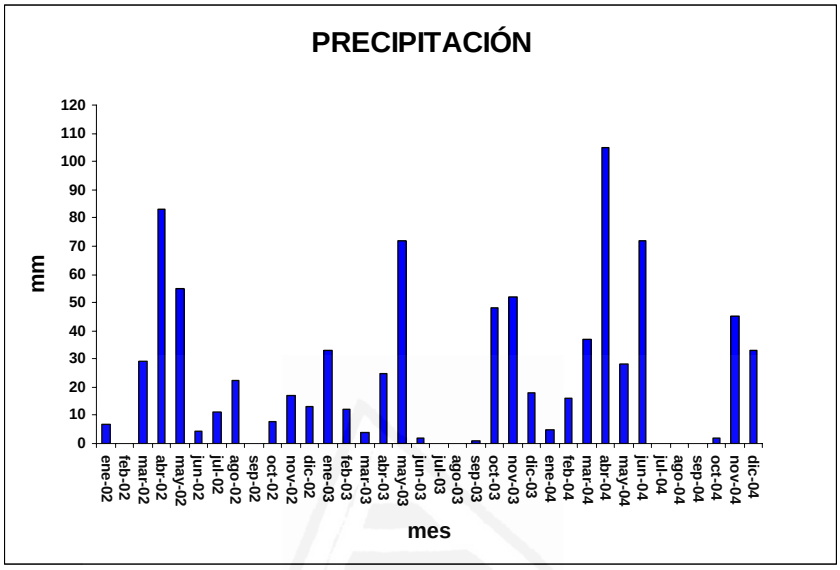


Figura 8. Variación mensual de la precipitación de Guardamar del Segura.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Estacionalmente, la mayor cantidad de precipitación observada durante el periodo de investigación se presentó en primavera de 2004 (237,6 mm), respecto a la primavera del año 2003 (103,8 mm), los inviernos del 2002 y 2003 han sido muy similares (36 y 45 mm), los otoños del 2003 y 2004 se han diferenciado fuertemente ya que se han registrado 118 mm y 80 mm respectivamente. Estos valores contenidos en la figura 8 nos muestran que efectivamente ha existido una irregularidad en los eventos de lluvia durante el periodo de muetreo, lo que corresponde a desviaciones estándar por encima de 24.3, con una media de error de 7.10 y 7.32. Esta variabilidad inter-anual, estacional y mensual es característica de las zonas Mediterráneas (Bellot, 1988; Chirino, 2003; Garcia, 2005 y Saquete, 2005, entre otros).

Pese al poco número de precipitaciones registradas durante el periodo de investigación, la distribución de las lluvias siguen las pautas típicas del litoral mediterráneo ibérico,

siendo mayores precipitaciones en primavera y otoño (Peñarrocha, 1994) estando condicionadas por el relieve, la orientación de la costa y la presencia del litoral (Clavero, 1994).

Las precipitaciones mínimas se registraron en verano, característica particular de la fachada mediterránea (López Bermúdez, 1990), meses muy calurosos marcados por un fuerte déficit hídrico (Gil Olcina, 1994).

3.4.2 Química de la precipitación.

La presente investigación se ha analizado la fracción soluble del agua de precipitación recogida en los pluviómetros instalados en la parcela del ecosistema dunar de Guardamar del Segura y los cuales sirvieron de colectores de deposición global. No se conocen datos bibliográficos de las concentraciones químicas de los flujos hídricos de este sistema dunar siendo por tanto un estudio novedoso en este aspecto.

Uno de los principales objetivos del estudio de la composición química de la precipitación es conocer el aporte de nutrientes que por esta vía llegan al ecosistema y que son medidos con pluviómetros convencionales, comportándose así la atmósfera como un compartimiento más del sistema del cual se obtienen nutrientes y se liberan otros. Es útil, por último, también examinar algunas relaciones iónicas y establecer el origen de los compuestos solubles analizados.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Las actividades humanas influyen en la química de la precipitación tanto como los diversos factores metereológicos (origen, cantidad y frecuencia de la lluvia), ya que el consumo de combustibles en invierno implica mayores emisiones de SO_2, o mayor transporte de material particulado cuando se preparan los suelos para cultivar.

3.4.2.1 Evolución anual y estacional de los iones.

Como indica Domingo, 1991 no es posible sacar conclusiones de la variación interanual de datos de series cortos, es decir inferiores a 3 años, pero si es útil para conocer el comportamiento que pueden presentar algunos iones en un ecosistema.

Se ha analizado la variabilidad interestacional mediante un análisis de varianza y posterior aplicación del test de Pearson para conocer la correlación existente entre las variables. El análisis se ha analizado con las concentraciones medias ponderadas por el volumen de cada evento. La tabla 1 enseña las concentraciones durante todo el periodo de investigación y para cada estación climatológica durante los años 2002, 2003 y 2004, aunque algunos de estos no se muestrearon en su totalidad.

Hemos realizado un análisis de la varianza entre las estaciones de todos los años, teniendo como resultado que no existen diferencias significativas entre las cuatro estaciones climatológicas. En cuanto a los valores medios ponderados de la composición química se observa que las lluvias de otoño son las más concentradas en iones calcio, sodio y sulfato. También se aprecia que las precipitaciones de invierno fueron donde se registraron los valores más bajos de potasio, magnesio y cloruro. Primavera presento los valores más altos de cloruro.

Estación		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Cl^{-}	$(N0_3)^{-}$	$(S0_4)^{2-}$
invierno 04	Media	279,90	60,66	34,45	158,69	180,88	36,80	93,54
	Desv. típ.	123,60	19,16	8,60	37,43	25,27	7,04	16,51
primavera 04	Media	216,50	43,21	25,68	101,93	141,72	33,34	104,34
	Desv. típ.	128,55	24,10	12,53	51,55	52,96	17,06	79,53
otoño 03	Media	211,18	43,00	35,47	251,99	200,72	29,14	136,10
	Desv. típ.	80,09	21,05	23,37	103,70	95,03	7,36	34,98
primavera 03	Media	226,99	77,95	49,75	259,21	302,48	47,98	126,07
	Desv. típ.	128,06	29,92	15,41	98,11	106,72	17,31	60,94
invierno 03	Media	196,47	44,52	22,26	126,29	80,78	25,21	56,53
	Desv. típ.	18,55	16,47	2,74	36,08	12,93	8,26	23,25
otoño 02	Media	286,51	50,91	33,48	198,00	177,09	24,10	133,65
	Desv. típ.	17,47	44,84	14,39	45,55	52,11	11,28	73,23
verano 02	Media	201,26	64,54	19,52	185,51	160,63	39,30	105,35
	Desv. típ.	110,73	23,02	7,51	54,60	48,52	17,39	57,52

Tabla 1. Concentraciones medias estaciónales ponderadas por volúmenes de precipitación (valores expresados en µeq/l).

Los rangos de variación de las concentraciones iónicas en la deposición global en nuestro ecosistema, son muy acusados, siguiendo la misma pauta que las encontradas en otras áreas mediterráneas (Bellot, 1989; Domingo, 1991; Avila, 1988).

En la tabla 2 se muestran los coeficientes de variación de las concentraciones para todo el tiempo de muestreo, y en las que observamos como el Magnesio presenta la mayor

variabilidad interlluvia 82,45 %, seguido del sulfato 81.18 %. Los parámetros de menor variabilidad son el cloruro con 70.17 % y los nitratos 68,46 %.

Variable	Media	Coef. Variación	Volumen total de Lluvia
Ca^{2+}	171,68	73,21	532 mm
Mg^{2+}	42,55	82,45	
K^{+}	24,29	74,13	
Na^{+}	144,87	72,89	
Cl^{-}	141,54	70,17	
$(N0_3)^{-}$	26,17	68,46	
$(S0_4)^{2-}$	80,65	81,18	

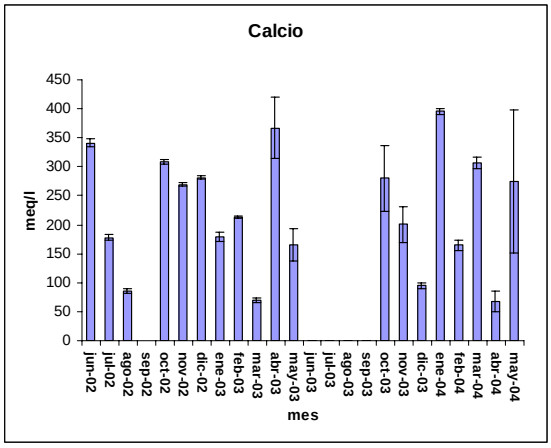
Tabla 2. Medias ponderadas por volumen y sus coeficientes de variación para el periodo de muestreo (valores expresados en µeq/l).

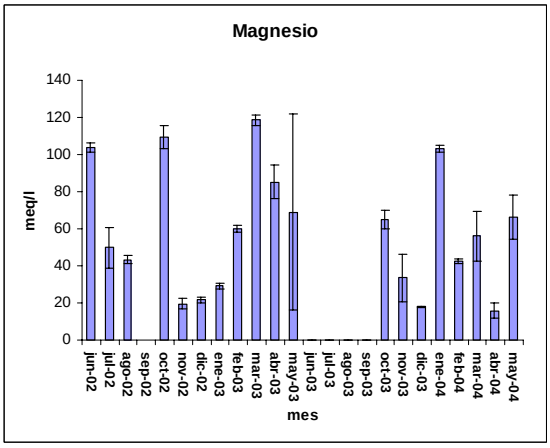
La figura 9 muestra las concentraciones medias mensuales de la precipitación, en esta se observa una gran irregularidad de los iones disueltos en ésta, variaciones que siguen las mismas pautas a las encontradas en otras zonas del mediterráneo español (Rodà, 1983; Avila, 1987; Bellot 1989; Domingo 1991; Carratalá *et al*., 1996). Las lluvias han presentado altos contenidos de calcio en los meses enero de 2004, abril de 2003 y junio de 2002. En el caso del magnesio las mayores concentraciones se registraron en marzo 2003 y octubre 2002. El potasio registra sus mayores picos en los meses de abril 2003 y noviembre 2003. El sodio presenta los mayores valores en los meses de octubre y marzo de 2003.

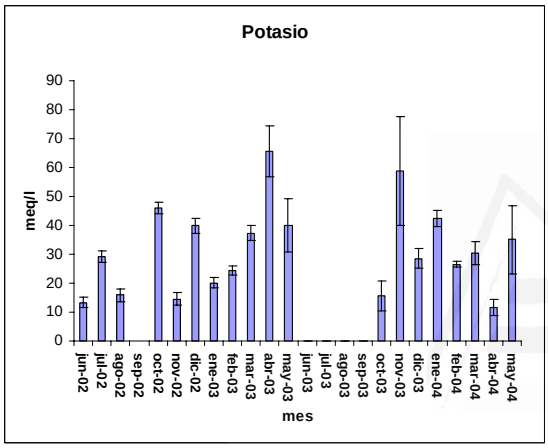
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

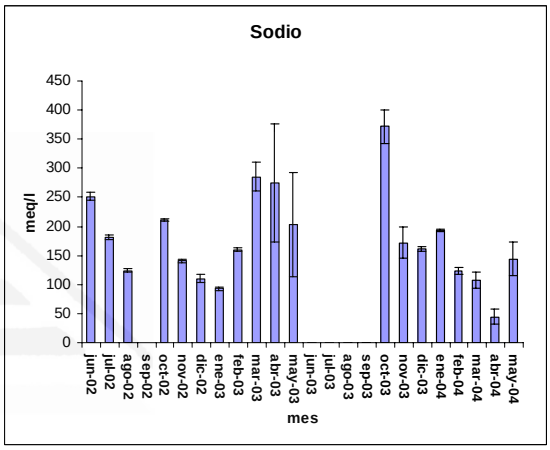
La baja inestabilidad registrada en la cantidad de precipitación (101%) en comparación con otras zonas, (Rodá, 1983) da para la zona del Motseny un coeficiente de variación de 132%. Esta variabilidad anormalmente alta para el sudeste español según Domingo, 1991 se debe a eventos lluviosos (tanto en frecuencia como en volumen).

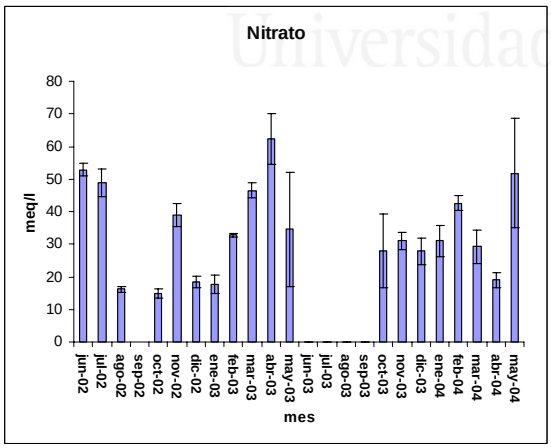
Figura 9. Concentraciones medias ponderadas mensuales de la precipitación.

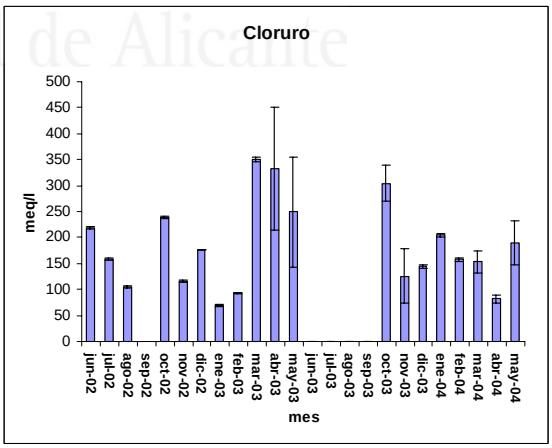




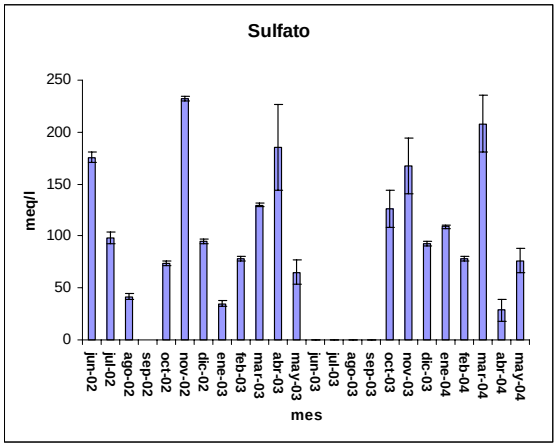








Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Como se observa en la figura 10 el comportamiento de los iones cloruro y sodio siguen una pauta muy similar a lo largo de todo el periodo de investigación, donde los valores de concentración de ambos iones coinciden. Su origen en este periodo es claramente marino. Las contribuciones iónicas de origen marino mantienen unas proporciones constantes, aunque estos valores pueden varían ligeramente (Keene *et al*., 1986).

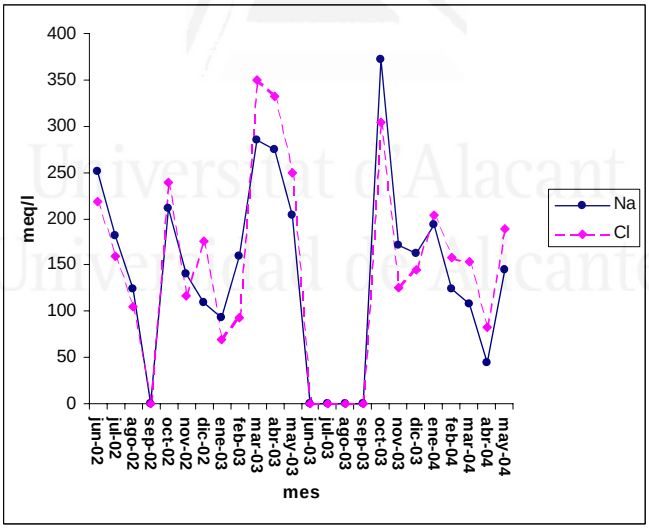


Figura 10. Variación de las concentraciones mensuales del sodio y cloruro.

En la figura 11 se muestra la relación entre las concentraciones de los diferentes iones analizados en la precipitación y volumen de la misma. En ella puede observarse como al disminuir el volumen, las concentraciones tienden a aumentar, este comportamiento ha sido puesto de manifiesto en diversas investigaciones (Hoffman *et al*., 1980; Rodà, 1983; Avila, 1987; Bellot, 1989; Domingo, 1991; Carratalá, 1997 entre otros)

Wolaver y Lieth (1972) señalan que con esta representación (volumen versus concentración) se pueden distinguir el Washout (proceso de lavado que enriquece el agua con gases y aerosoles) del Rainout (proceso por medio del cual se modifica la composición del agua recién condensada) describiendo dos tipos de comportamientos.

El primero obteniendo una curva con una hipérbola cuadrática con dos ramas bien definidas una vertical y otra horizontal. La primera se debe al efecto de la fuente inagotable de iones situada en la baja atmósfera que con la lluvia da origen al Washout. El Rainout en la rama horizontal, proviene de los aportes estables que se mantiene una vez terminado el Washout.

El segundo comportamiento presenta una curva hiperbólica con un vértice menos acusado e indicaría la presencia de aportes elevados de origen natural o antropogénico, y con un efecto de dilución más lenta puesto que las reservas iónicas en este caso serían mayores. La formulación matemática de estos procesos en los que interviene tanto lo físico como lo químico son muy complejos (Meszaros, 1981) y no suele recoger eficazmente la complejidad de los procesos atmosféricos implicados en la determinación de la química de la precipitación (Carratalá, 1993). Sin embargo las relaciones existentes entre las concentraciones iónicas de la lluvias y el volumen, ya sea de forma exponencial, hiperbólica, potencial, etc. han sido muy utilizadas por Wolaver y Lieth, (1972), Rodà, (1983), Avila, (1987), Bellot, (1989), Domingo, (1991) y Carratalá (1993). Las características comunes y la utilidad que presentan estos modelos son muy importantes e interesantes a la hora de intentar asociar los procesos al Washout o Rainout.

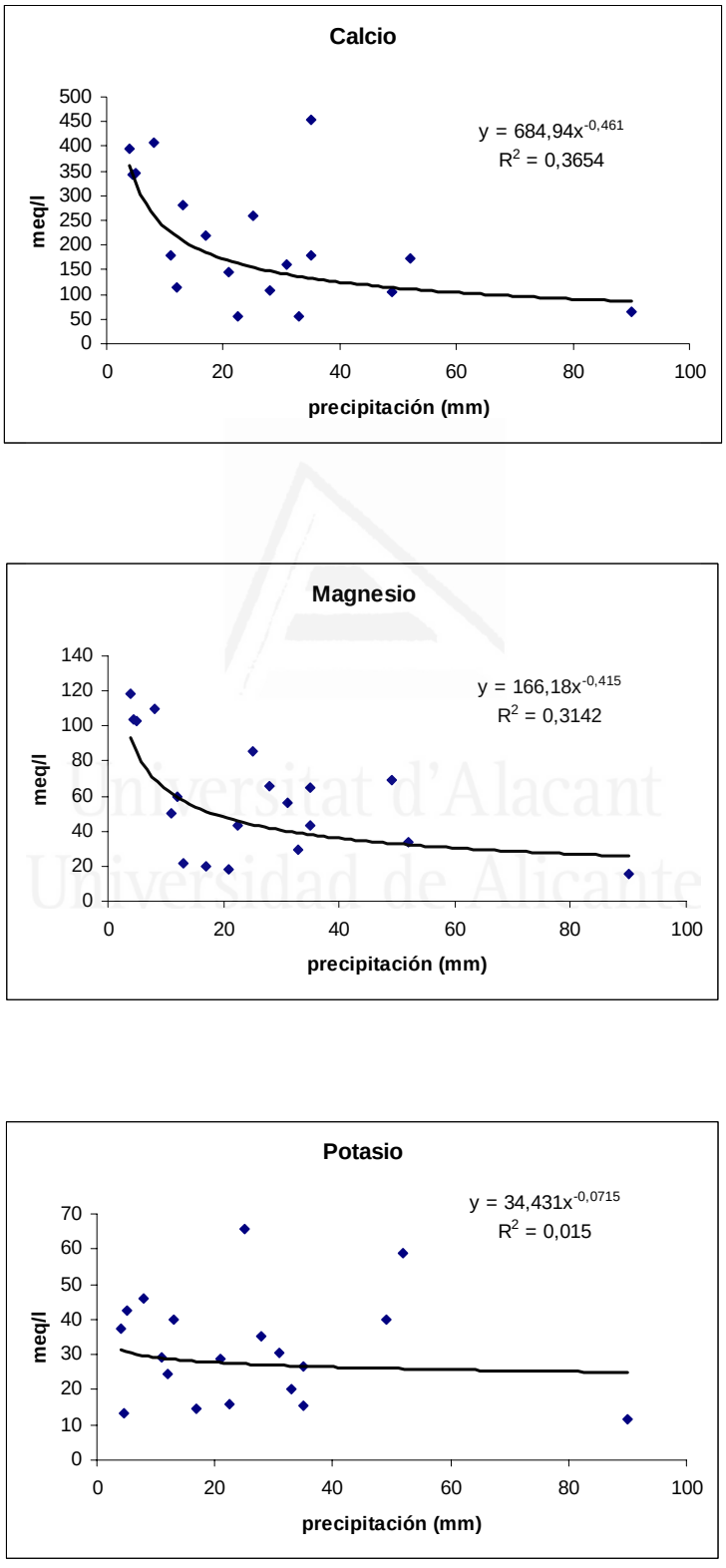
La figura 11 también tiene importancia puesto que los efectos de lavado de la atmósfera dependen en gran medida del volumen de las concentraciones iónicas comúnmente conocido como el efecto “dilución”.

En nuestro estudio, la definición de estos dos comportamientos no es muy clara en algunos iones este es el caso del potasio y nitrato. Según esto los iones magnesio, calcio, sodio, cloruro y quizás el sulfato presentan más o menos definida la rama horizontal del Rainout. La presencia de este comportamiento indicarían la existencia de

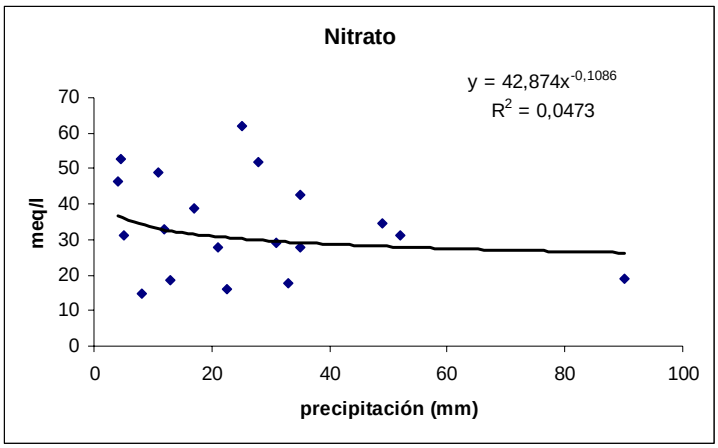
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

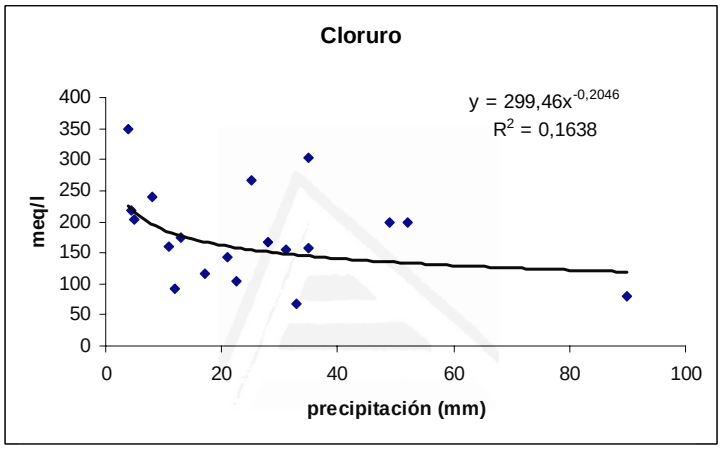
fuentes de aerosoles marinos ya que no sufren proceso de dilución al aumentar el volumen de precipitación (Domingo, 1991).

Figura 11. Representación de las concentraciones de los iones frente al volumen de precipitación.

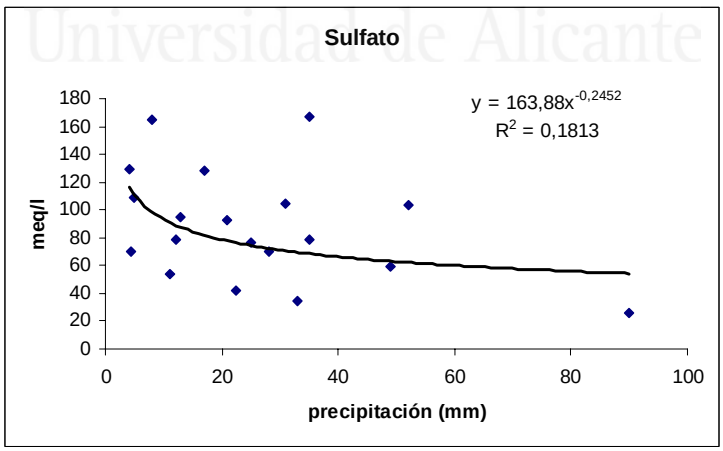


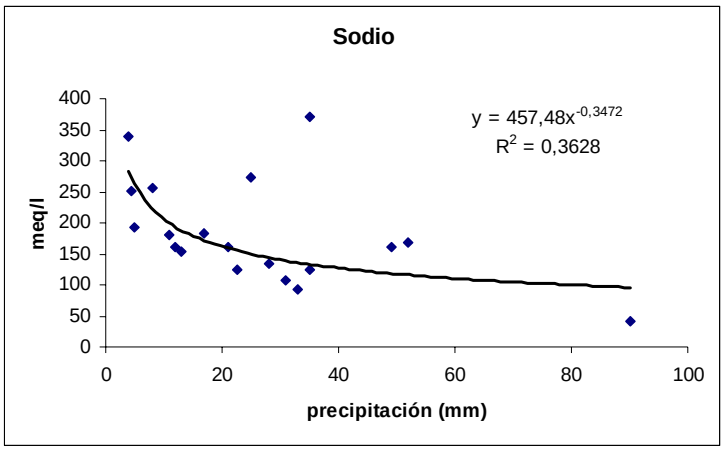
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante





3.4.2.2 Origen de los iones.

Los cationes y aniones presentes en el agua lluvia tienen procedencia muy diversa. Se sabe que esta diversidad de fuentes incluye polvo terrestre, contaminantes atmosféricos, aerosoles marinos y emisiones volcánicas. Gambell y Fisher (1966), Likens *et al*., 1977, Krauskopf (1979), Mészaros (1981), Underwood *et al*., 1988, Bellot y Escarre (1988), Domingo (1991), Durand *et al*., 1992, Camarero y Catalán (1993), Carratalá (1997) etc. aportan valiosa información acerca de los cambios y vías que siguen algunos de los iones más conocidos: sodio, cloruro, sulfatos, magnesio etc.

Gambell y Fisher (1966) y Keene (1986) elaboran los primeros estudios para conocer la procedencia de los iones, aportan una vasta información sobre el posible origen marino o terrestre de los iones más frecuentes en el agua lluvia. El método seguido por estos autores ha sido utilizado posteriormente en las investigaciones de krauskopf (1979), Roda (1983), Bellot (1987), Lacaux (1988), Piñol (1990), Carratalá (1997) entre otros.

Si hacemos una comparación entre los cocientes iónicos que proponen Keene *et al*., (1986) y los obtenidos en la precipitación de Guardamar del Segura tendremos una aproximación al origen de los distintos iones analizados. En la tabla 3 se muestran estos cocientes y se observa una gran coincidencia entre el cociente Cl^- / Na^+ y el Mg^{2+}/ Na^+ obtenidos para el agua de lluvia y el agua de mar. Respecto a los cocientes entre $S04^=$, K^+ y Ca^{2+} con el Na^+, se encuentran valores mayores en la precipitación que en el agua de mar.

	Cl^-/Na^+	$S04^=/Na^+$	Mg^{2+}/Na^+	K^+/Na^+	Ca^{2+}/Na^+	Ca^{2+}/Mg^{2+}
Precipitación de Guardamar del Segura	0,97	0,59	0,29	0,17	1,18	4,03
Agua de mar	1,16	0,12	0,24	0,021	0,044	0,19

Tabla 3. Valores de los cocientes iónicos calculados en la precipitación de Guardamar del Segura y el agua de mar.

Se ha comprobado que todos los iones presentes en al agua de lluvia están correlacionados entre sí. En la tabla 4 se presenta la matriz de coeficientes de correlación entre las concentraciones de todos los iones analizados, junto con el pH y la conductividad. Los valores más elevados del coeficiente de Pearson se dan entre Na^+ y Cl^- con r=0,949 y entre Cl^- y Mg^{2+} con r=0,840. El valor de correlación de iones más bajo encontrado fue el de Mg^{2+} y $S04^=$ con r=0,507.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	N03	S04
Ca	1,000						
Mg	0,618	1,000					
K	0,646	0,581	1,000				
Na	0,675	0,829	0,628	1,000			
Cl	0,661	0,840	0,749	0,949	1,000		
N03	0,641	0,640	0,627	0,726	0,747	1,000	
S04	0,750	0,507	0,537	0,679	0,664	0,743	1,000

Universidad de Alicante

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre las concentraciones iónicas del agua de precipitación.

3.4.2.3 Relación entre el cloruro y el sodio.

Cuando las correlaciones existentes entre los iones cloruro y sodio del agua de precipitación son significativas, por lo general su explicación se debe al origen marino de ambos iones, la influencia marina en la química de la precipitación de Guardamar del Segura es evidente pues esta localidad se encuentra a la orilla del mediterráneo y son muy frecuentes en primavera los temporales de levante aportando cantidades considerables de estos iones. Para determinar el origen marino o no de estos iones se comparan sus cocientes en el agua de lluvia y en el agua de mar.

Habitualmente el valor que toma dicho cociente en el agua de mar es de 1,16 (Keene *et al*., 1986), pero sin embargo este se ve alterado por a lluvia. Algunos autores apuntan que esta relación se puede alterar en función de la proximidad o lejanía de la estación de muestreo respecto a la costa (Domingo, 1991) y habitualmente no se suele cuantificar, dado que se necesitaría disponer de puntos de muestreo repartidos en un rango amplio de distancias al mar y especialmente en distancias próximas a la costa. En Guardamar del Segura ubicamos los colectores de lluvia a una distancia de 1 Km de la costa, y encontramos una elevada correlación entre los iones cloruro y sodio. Esto indica claramente que su procedencia es el agua de mar.

Es importante señalar que a lo largo de todo el periodo de muestreo existió una buena compensación de los iones como puede verse en la figura 12.

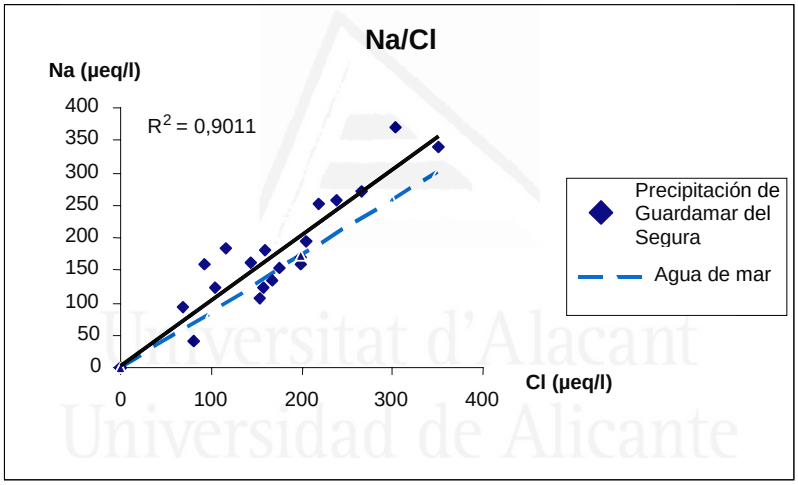


Figura 12. Relación entre las concentraciones medias mensuales de sodio y cloruro en la precipitación de Guardamar del Segura.

3.4.2.4 Relación entre el magnesio y el sodio.

El magnesio es un catión de procedencia mixta pues procede tanto de polvo terrestre como de aerosoles marinos, pero es difícil establecer con exactitud su origen.

En este estudio, el cociente magnesio-sodio tiene proporciones muy similares a las del agua de mar, este comportamiento es paralelo durante todo el periodo de muestreo (Fig.

13). Aunque todos los valores están por encima de la línea que marca el cociente del agua de mar los datos más altos se registraron en época estival.

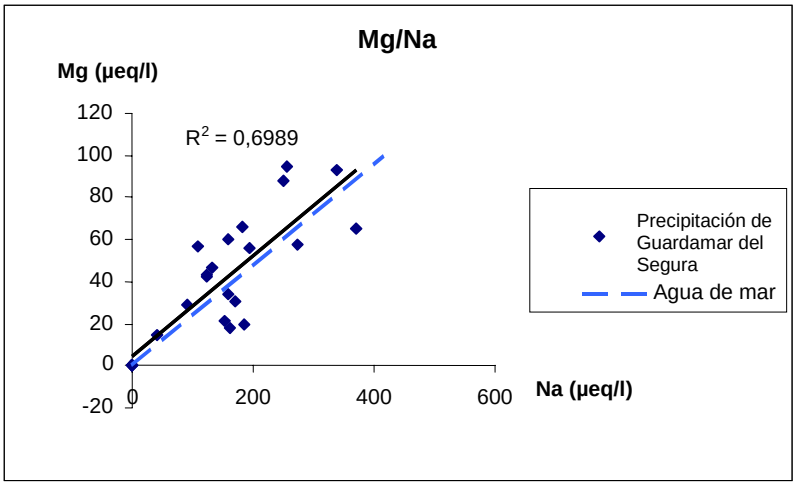


Figura 13. Relación entre las concentraciones medias mensuales del magnesio respecto a la del sodio en el agua de precipitación de Guardamar del Segura.

3.4.2.5 Relación entre el calcio y el magnesio.

El calcio es ión de origen predominantemente terrestre. Los datos del cociente de estos iones en la precipitación del ecosistema dunar (4,03), sobrepasan los valores dados por Keene (1986) para el agua de mar (0,19). Las variaciones de estos durante el periodo de estudio han sido muy irregulares, y siempre excediendo la línea que representaba el cociente marino (Fig. 14).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

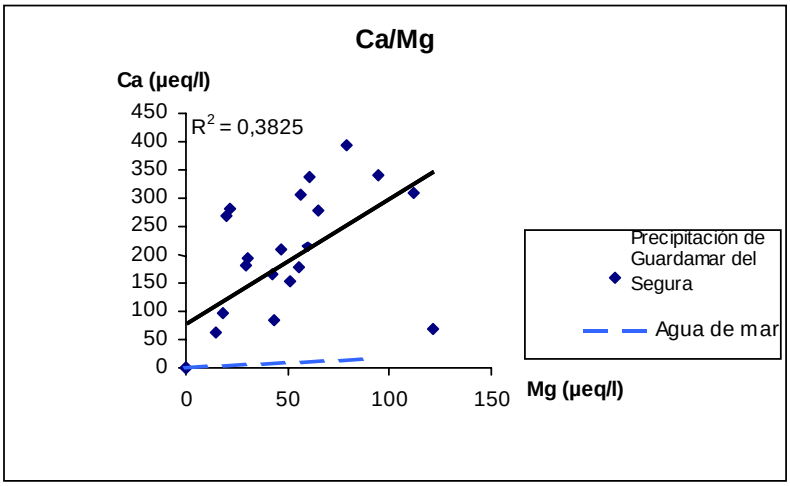


Figura 14. Relación entre las concentraciones medias mensuales de calcio frente a las de magnesio en el agua de la precipitación de Guardamar del Segura.

3.4.2.6 Relación entre el sulfato y el cloruro.

Al realizar una comparación de los dos elementos sulfato-cloruro como se muestra en la figura 15, observamos claramente que dicho cociente es superior al que presenta el agua marina, para esos mismos iones, de donde se deduce que el sulfato tiene influencia continental en las lluvias del Guardamar del Segura.

En zonas con una considerable contaminación atmosférica, la mayor parte del sulfato de la precipitación proviene de la disociación del sulfúrico, responsable del 60% de la acidez de la lluvia (Likens *et al.*, 1977). Sin embargo, en zonas con escasa contaminación la mayor parte del sulfato proviene de otras fuentes, como por ejemplo de actividades agropecuarias, o de la utilización de combustibles fósiles. En nuestro caso es más probable que proceda de las actividades agrícolas, dado el gran desarrollo que poseen en esta zona. En Guardamar del Segura el sulfato no es ion dominante en el agua de lluvia, así mismo no se encontró acidez en las muestras analizadas, quizás porque la mayor parte de sulfatos penetra en forma de sales (Bellot, 1989).

También es probable que la capacidad del calcio para neutralizar la acidez debida o controlada por el sulfato, sea el responsable de la poca relevancia del "input" de este ion sobre la acidez tal como han comprobado Gracia y Elejalde (1978).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

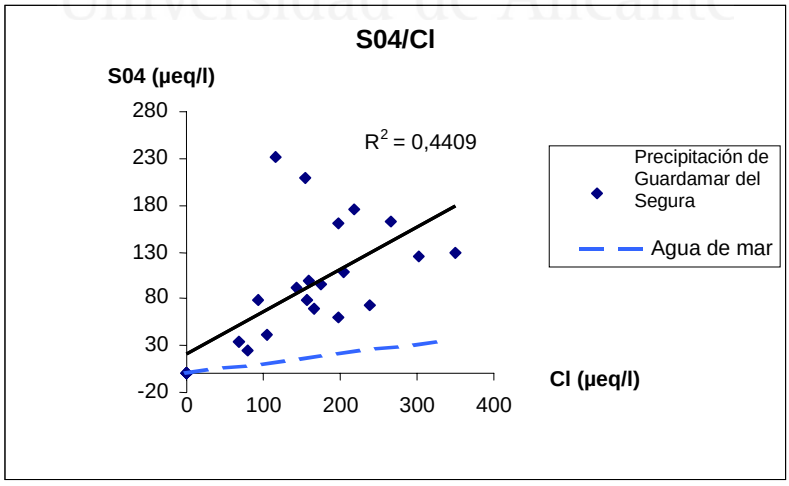


Figura 15. Representación de las concentraciones medias mensuales del ion sulfato respecto a la del cloruro en el agua de precipitación de Guardamar. Se muestran también la línea del cociente del agua de mar.

3.4.2.7 Análisis multivariante de la precipitación de Guardamar del Segura.

Una manera objetiva de agrupar los iones atendiendo al conjunto de correlaciones existentes entre ellos es la efectuada mediante un análisis de componentes principales. Este análisis tiene por objeto reducir las dimensiones de un problema multidimensional, con una perdida de información mínima. Se aplicó a la matriz formada por las 7 variables químicas analizadas (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Cl^{-}, $N0_3^{-}$ y $S0_4^{=}$). El método del análisis factorial, ha sido aplicado en química ambiental para identificación de fuentes, tanto en el caso de la composición química de aerosoles (Gatz, 1978; Pratt y Krupa, 1985) como de la precipitación (Gatz, 1983; Lacaux, 1988; Avila, 1987; Piñol, 1990; Bridgman, 1992).

Existen fuentes y/o procesos que afectan la calidad de las precipitaciones, por una parte las naturales y en segundo lugar las antropogénicas que pueden ser móviles (vehículos, aeronaves etc), inmóviles (industrias) o compuestas (aglomeraciones industriales y áreas urbanas). En el presente trabajo pretendemos identificar las fuentes y el origen que varían la calidad de las lluvias de Guardamar del Segura.

En la tabla 5 y en la figura 16 pueden verse los tres ejes resultantes del análisis factorial de los valores de precipitación. Estos ejes representan el 80,5%, de la varianza del sistema.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Matriz de factores rotados(a)			
	Eje		
	1	2	3
Ca	0,354	0,645	0,397
Mg	0,752	0,292	0,303
K	0,381	0,347	0,694
Na	0,840	0,442	0,225
Cl	0,810	0,370	0,428
N03	0,473	0,602	0,323
S04	0,307	0,836	0,208

Tabla 5. Correlación de cada una de las variables medidas con los factores principales para los valores medios ponderados mensuales.

El primer eje agrupa las variables Na^+, Cl^- y Mg^{2+} que identifican las lluvias de origen fundamentalmente de origen eminentemente marino. Este factor explica el 35,9% de la varianza.

En el segundo eje las variables con mayor peso son $S04^=$ Ca^{2+} y $N03^-$ Esta componente tendría un origen terrestre. Este factor explica el 28,7% de la varianza.

En el eje 3 está dominado por el catión K^+, el cual no esta correlacionado con ningún otro ion, lo que nos hace suponer que su origen sea probablemente mixto. Explica el 15,9% de la varianza.

Este análisis factorial ha sido aplicado en estudios de precipitación. Así, Zeng y Hopke (1990) encontraron que las fuentes más importantes en la lluvia canadiense son de forma decreciente: una componente antropogénica formada por el $S04^=$, $N03^-$ y H^+, otra marina, formada por Cl^- y Na^+, y otra terrestre formada por los iones asociados a agentes neutralizantes Ca^{2+}, Mg^{2+} y NH_4^+. Estas mismas han sido descritas en distintas zonas de Europa por (Durand *et al.* 1992; Duysings *et al*., 1986; Domingo, 1991; Carratalá, 1997) y en estados unidos (Gorham *et al*., 1984; Crawley y Sievering (1986) donde la precipitación tiene carácter ácido. Por el contrario, las fuentes encontradas en Guardamar del Segura son concordantes con los datos encontrados en otras zonas ya mencionadas, donde los agentes neutralizantes son más abundantes. Así los datos encontrados en bibliografía más próximos a los realizados en esta investigación, son los de Carratalá (1997) esta encuentra que los iones Cl^-, Na^+, $N03^-$ y Mg^{2+} son de origen marino el Ca^{2+} y el H^+ representan el gradiente de acidez y el NH_4^+, F^- y el K^+ no tiene un origen muy claro, aunque dice que quizás pueda atribuirse a actividades agrícolas. También serían comparables a los obtenidos por Gatz (1983) que explica un 29% de la varianza de la composición de las lluvias en Illions (Estados Unidos) por una fuente de origen terrígeno, un 25% por un factor de neutralización ($NH4^+$, $S04^=$ y $N03^-$), el 19% por un factor marino (Cl^- y Na^+) y por último explicando solo un 13% de la varianza total parece una fuente antropogénica (H^+ y $S04^=$). También han sido descritas fuentes similares en otras zonas de la península ibérica (Avila, 1987; Lacaux, 1988; Bellot y Escarré, 1988; Domingo, 1991; Carratalá, 1993; Gonzales, 2000; Rodrigo *et al*., 2003).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

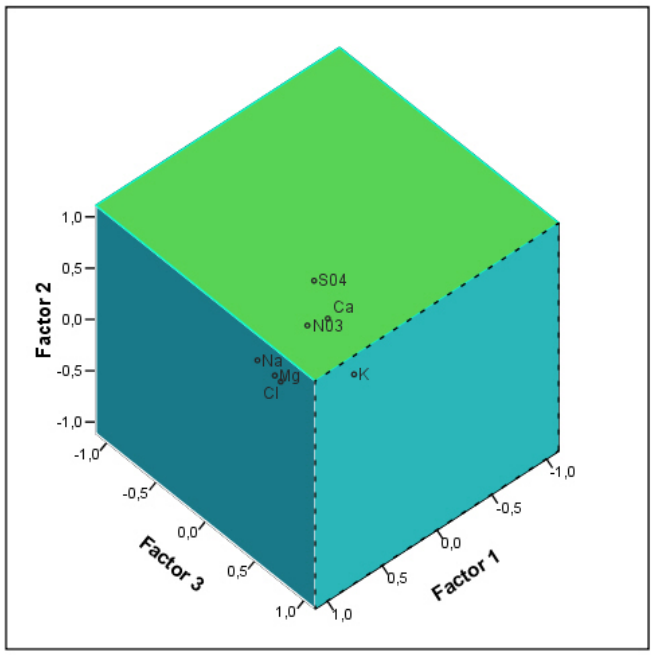


Figura 16. Correlación de las variables con cada uno de los factores. El factor 1 representa el origen marino, el factor 2 representa un origen terrígeno y el factor 3 representa un origen mixto.

3.5 CONCLUSIONES.

- La concentración química media de la deposición global en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura esta caracterizada por alta carga iónica. Predominan los iones calcio y el cloruro representando ambos la mitad de todo el contenido iónico (27% el calcio y 23,88% el cloruro).

- Un análisis multivariante aplicado sobre las concentraciones químicas de la precipitación, detecta la existencia de un primer eje que separa la componente marina, caracterizado por altas concentraciones de Cl^-, Na^+ y Mg^{2+} y un segundo eje que separa la componente terrestre de la cual forman parte los iones $S04^=$, $N03^-$ y Ca^{2+}. Por ultimo aparece un tercer eje que agrupa los iones de origen mixto del cual hace parte solo el potasio.

- La variación temporal de las concentraciones es grande. Los iones analizados muestran unos coeficientes de variación situados entre el 59% para el calcio, 52% para el cloruro, 51% para el sodio, 50% para el magnesio, 44% para el sulfato, 35% para el sulfato y 13% para el potasio.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO IV
TRASCOLACIÓN

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.1 INTRODUCCIÓN.

Del total de las precipitaciones que llegan a la copa de los árboles, una fracción atraviesa el dosel goteando desde las hojas, desde donde llega al suelo. Esta fracción se conoce como trascolación (Tr). Otra parte utiliza el fuste de los árboles para alcanzar la superficie el suelo y se conoce con el nombre de escorrentía cortical (Ec). Por último una parte es retenida por la vegetación llamada interceptación de la cual una porción se evapora y otra es almacenada por la cubierta vegetal.

Los flujos de trascolación y de escorrentía cortical, forman el grueso de la precipitación que alcanza el suelo, es decir, la precipitación neta. La distribución de este volumen depende de: la cantidad de biomasa, ángulo de las ramificaciones, capacidad de almacenamiento de la especie, rugosidad de la corteza y longitud del tronco entre otras. Es decir cada especie tiene un comportamiento diferente que varia en función del tiempo, de la biomasa presente en cada momento y de las características de los episodios de precipitación. En el presente capitulo abordaremos el estudio de la trascolación.

El agua de trascolación, transporta elementos minerales y es una vía paralela a la del desfronde y escorrentía cortical en el retorno de nutrientes desde los vegetales al suelo. Su valor relativo, con respecto a la cantidad total de precipitaciones no es relevante, pero puede ser importante porque llega a la zona donde se sitúa la mayor cantidad de raíces (Huber y Trecaman 2000b). Por otra parte la copa de los árboles actúa a modo de embudo colector del agua incidente, redistribuyéndose en su interior debido a las ramas y hojas, pudiéndose obtener determinados puntos de concentración de agua, como por ejemplo las márgenes de las coronas (Kittridge, 1973; Ulrich, 1971).

Por lo tanto, la cubierta vegetal tiene influencia no solo en la cantidad sino en la calidad química del agua, dado que esta imprime una variación marcada diferente a la deposición global (Miller, 1963). Entre las posibles causas que producen el cambio de calidad, se encuentran procesos metabólicos como la lixiviación o la traslocación, así como los distintas deposiciones sobre la superficie de la masa forestal ya sea mediante las gotas de lluvia o las partículas secas de polvo o aerosoles (Galloway y Parker 1979). Otros autores como Miller (1963) y Carlisle *et al*., 1967 hacen referencia a que estos

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

cambios en la composición química obedecen a procesos de crecimiento y absorción foliar. Cambios que implican fenómenos de arrastre y de absorción (Tukey, 1970; Zinke, 1962; Miller, 1963; Gesper y Holowaychuk, 1971; Aussenac y Granieer, 1988; Andersen *et al.,* 1993; Lin *et al.,* 200; Kelly y Strickland 1986; Rodrigo *et al*., 2001).

El reciclaje de nutrientes está intrínsecamente relacionado a los flujos hídricos. Muchos de estos nutrientes entran por vía atmosférica y son transportados de un compartimiento a otro en el bosque por el agua (Parker, 1983; Bruijnzeel, 1990; Likens y Bormann, 1995). Por lo tanto conociendo la composición química del agua entrante (precipitación) y el lavado del dosel y troncos (trascolación y escorrentía cortical) se determinarán las entradas de algunos nutrientes en el ecosistema. La influencia de la cubierta vegetal en los cambios que se producen en el agua al atravesarla, tiene mucho interés, por cuanto, con este flujo los nutrientes son rápidamente reciclados desde las plantas al suelo.

La composición química de la precipitación neta está controlada por: la intensidad de la lluvia que regula el grado de lixiviación de elementos desde las hojas, la deposición gaseosa y material particulado y la captación de nutrientes por las plantas (Parker, 1983; Schaefer *et al.,* 1988; Veneklaas, 1990).

Por consiguiente el flujo de la trascolación, junto con la escorrentía cortical, son dos vías de transporte de agua y de nutrientes, en que se desdobla la precipitación en su contacto con la vegetación, antes de llegar al suelo. Los cambios químicos son diversos, resumiéndose, bien por un aporte de elementos por la planta al agua, o bien en sentido inverso siendo el agua el que aportaría parte de su contenido en nutrientes a la planta. Para cuantificar ese intercambio, es necesario, como primera medida, conocer la entrada de nutrientes por la deposición global y la salida de estos una vez a traspasado la masa forestal considerado en su conjunto (circulación hasta el suelo del agua a través de la copa y escurrimiento a lo largo de ramas y tronco). Este estudio sería aún más útil si pudiéramos cuantificar parte de los elementos aportado por el lixiviado de la propia planta y cual corresponde a la deposición seca. Ha sido éste el objetivo primordial de multitud de trabajos en varios trabajos (Sollins, 1980; Olson *et al*., 1981; Reiners y Olson, 1984; Lovett *et al*., 1985; Bellot, 1989; Domingo, 1991; Rodà, 2000). Afrontaremos en este capitulo, el estudio de la magnitud de este flujo en cuanto a los aportes de nutrientes y a los cambios en la concentración iónica que se producen en el

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

agua lluvia, al contactar ramas y hojas que forman la cubierta vegetal, comprobando el efecto especifico de ésta. En las dos especies arbóreas dominantes del ecosistema dunar de Guardamar del Segura, conscientes de que es difícil cuantificar los aportes por la deposición seca y por el lixiviado, debido a que las especies epifitas, la fauna, restos de vegetales y animales intervienen también en estos procesos de captación y liberación de nutrientes (Rodrigo *et al*., 2001).

Por otra parte la deposición seca (comprendida por gases, partículas sólidas y aerosoles que se depositan en la superficie vegetal) dan lugar a diversos procesos químicos (reacciones redox, ácido-base, etc) y físicos (adsorción, absorción y difusión) con el material vegetal y con el agua de lluvia dificultando su determinación (Dasch, 1987)

4.2 OBJETIVOS.

4.2.1 General.

Estudiar los iones calcio, magnesio, potasio, sodio cloruros, nitratos y sulfatos presentes en la trascolación.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.2.2 Específicos.

- Determinar las concentraciones iónicas de los elementos estudiados que llegan al suelo por este flujo y evaluar la diferente capacidad de cada una de las especies arbóreas dominantes en el ecosistema dunar (*Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L) para modificar la química del agua de precipitación.

- Calcular las tasas de enriquecimiento en nutrientes del flujo de la trascolación.

4.3 MATERIAL Y METODOS.

4.3.1 Sitio de muestreo.

Este estudio se llevó a cabo en la misma parcela donde se tomaron las alícuotas de precipitación, anteriormente descrita.

4.3.2 Muestreo de la trascolación.

Se cartografiaron un total de 50 pinos dentro de la parcela mallada y los datos se presentan en la tabla 6. El muestreo de la trascolación se realizo en árboles representativos de los tamaños presentes en el estrato arbóreo del ecosistema.

Posteriormente se instalaron dos colectores de cada copa de árbol, ubicados en línea pasando por el tronco, los colectores constaban de un embudo de 18 cm de diámetro acoplado directamente sobre un recipiente de 3 litros (Fig. 17). En el cuello del embudo se colocó una malla similar a la de los pluviómetros para impedir el paso de insectos, materiales gruesos y cualquier objeto extraño que pudiese alterar las muestras. Los recipientes se colocaron directamente en el suelo y ligeramente enterrados.

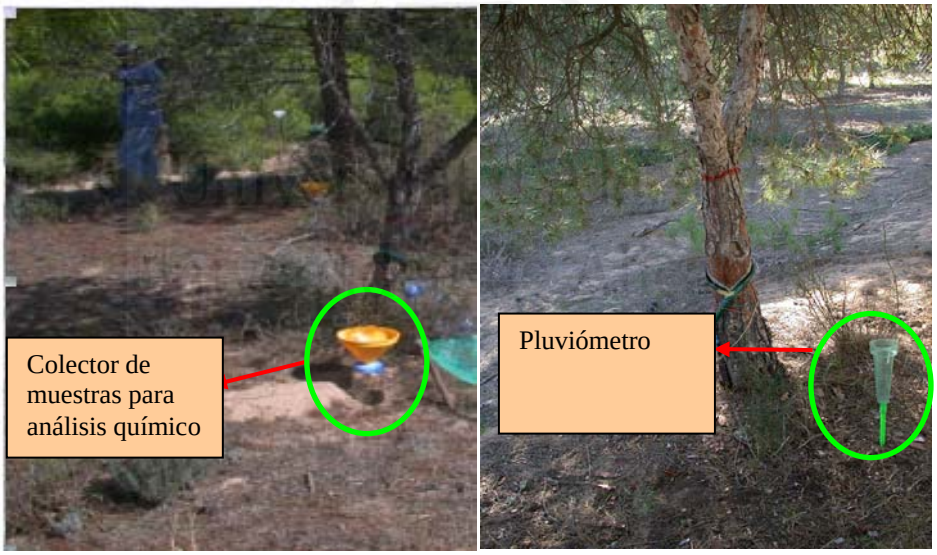


Figura 17. Colectores de muestras para análisis químico y pluviómetro.

Estos colectores proporcionaban el volumen trascolado que se usaba como la alícuota para el análisis químico. Los volúmenes fueron medidos con pluviómetros colocados bajo cada árbol (figura 17). Cuando las muestras para el análisis no eran suficientes se mezclaban las aguas de los colectores dispuestos en cada individuo.

Clase diamétrica	n	Código	DBH (cm)	Especies	Intervalos de clase (cm)
0	1	8	12,4	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	2	39	12,1	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	3	D	8,6	*Pinus pinea* L.	< 13
0	4	I	8,9	*Pinus pinea* L.	< 13
0	5	Z	8,1	*Pinus pinea* L.	< 13
0	6	A	8,9	*Pinus pinea* L.	< 13
0	7	28	9,2	*Pinus pinea* L.	< 13
0	8	C	8,6	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	9	41	9,2	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	10	Y	9,3	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	11	W	9,5	*Pinus pinea* L.	< 13
0	12	16	9,9	*Pinus pinea* L.	< 13
0	13	16	10,4	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	14	B	10,1	*Pinus pinea* L.	< 13
0	15	26	10,8	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	16	18	11,1	*Pinus halepensis* Miller	< 13
0	17	N48	10,5	*Pinus pinea* L.	< 13
0	18	Oj	10,5	*Pinus pinea* L.	< 13
1	1	37	13,4	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	2	Ql	14,3	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	3	P	15,6	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	4	46	16,7	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	5	9	13,2	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	6	20	13	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	7	5	13,3	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	8	30	13,9	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	9	29	13,4	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	10	44	13,4	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	11	L1	13,7	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	12	V	13,9	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	13	34	14,3	*Pinus halepensis* Miller	13 a 18
1	14	24	17,6	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	15	35	17,9	*Pinus pinea* L.	13 a 18
1	16	19	15,3	*Pinus pinea* L.	13 a 18
2	1	X	18,5	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	2	H	19,1	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	3	40	18,9	*Pinus pinea* L.	> 18
2	4	F	18,1	*Pinus pinea* L.	> 18
2	5	K	18,7	*Pinus pinea* L.	> 18
2	6	25	19,4	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	7	27	20,8	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	8	23	18,8	*Pinus pinea* L.	> 18
2	9	G	21,3	*Pinus pinea* L.	> 18
2	10	33	22	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	11	42	22,3	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	12	E	21,9	*Pinus pinea* L.	> 18
2	13	17	23,9	*Pinus pinea* L.	> 18
2	14	27	28	*Pinus pinea* L.	> 18
2	15	38	27,4	*Pinus halepensis* Miller	> 18
2	16	43	37	*Pinus halepensis* Miller	> 18

Tabla 6. Códigos, diámetros a la altura de pecho (DBH), intervalos y clases identificadas para cada árbol en la parcela mallada de Guardamar del Segura.

Al igual que para la deposición global, las muestras se recogían inmediatamente después de cada evento lluvioso y se limpiaban los depósitos con abundante agua desionizada. Tampoco se añadía ningún conservante.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.3.3 Plan de Muestreo.

Las muestras tomadas debían cumplir con los siguientes requisitos de tal modo que no se deterioraran o se contaminasen antes de llegar al laboratorio. Para ello, las botellas de 250 ml se enjuagaban con agua desionizada y luego con el agua de la muestra un par de veces. También se llevaba un control de cada muestra recogida, identificando cada botella mediante una etiqueta en la que aparecía información necesaria para identificar la alícuota (fecha, hora, lugar, código del árbol y tipo de muestra).

Los parámetros de conservación de las muestras se siguieron según lo establecido por el Standard Methods (1992) en la descripción de cada uno de los métodos de análisis.

4.3.4 Métodos de laboratorio.

Los métodos de laboratorio utilizados en el análisis químico se detallaron en el capítulo tres.

4.3.5 Métodos estadísticos.

Mediante un análisis de varianza ANOVA, hemos comparado los volúmenes de precipitación obtenidos en *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L con un nivel de significación de $P<0.001$.

También se ha aplicado un test no paramétrico para comprobar si las diferencias existentes entre las concentraciones medias ponderadas por volumen eran significativas en las dos especies arbóreas.

Para comprobar si existen diferencias significativas entre las concentraciones medias de los iones de la trascolación en las dos especies arbóreas dominantes del ecosistema, se ha aplicado un análisis de la varianza (ANOVA) de un factor, con un previo análisis de la homogeneidad de la varianza.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4.4 RESULTADOS.

Garcia, (2005) ha estudiado ampliamente la dinámica de agua en estas especies en la misma zona de estudio, y aunque su periodo de investigación es un poco diferente sus valores no difieren ostensiblemente respecto de los nuestros. Este autor encuentra en lluvias copiosas el pino piñonero retiene más agua, ya que recolecta bajo su copa el 65% de la precipitación, mientras que en el pino carrasco retuvo el 77% de la precipitación.

La relación entre el volumen de cada evento lluvioso y la trascolación medida las dos especies estudiadas (*Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L), puede observarse en la figura 18. Es previsible una dependencia directa entre estros dos flujos, puesto que la existencia de trascolación es consecuencia de que se produzca o no precipitación. Por tanto, se ha calculado y encontrado una relación lineal significativa entre ambos flujos. El valor obtenido para el coeficiente de correlación, ha sido de 0.9913 ($P < 0.001$). En la revisión bibliográfica encontramos relaciones semejantes para diferentes tipos de bosque: robledal y eucaliptal (Calvo de Anta *et al*., 1979), bosque tropical (Clements y Colon, 1975), encinar (Bellot, 1989), matorral y coniferas (Domingo, 1991), pino y roble (Cantú y Gonzáles, 2001), etc., aunque algunos autores señalan que esta relación no es lineal para pequeñas cantidades de precipitación (Slatyer, 1965; Szabó, 1985).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

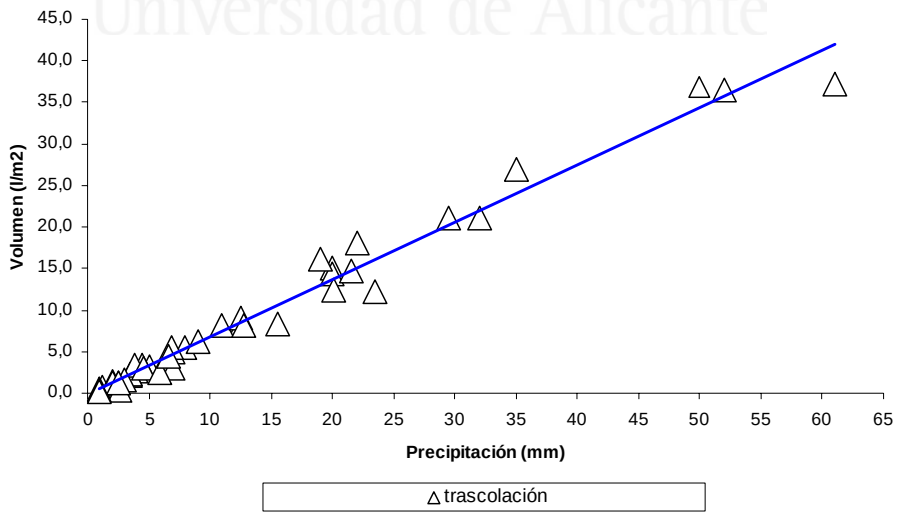


Figura 18. Relación entre la precipitación diaria y el volumen de trascolación medidos.

La trascolación en la pinada de Guardamar del Segura se da solamente en precipitaciones mayores de 3,2 mm. Efectuando comparaciones de volúmenes entre las dos especies observamos que a través del pino de halepo llega al suelo el 69%, mientras que el pino piñonero retiene más agua, ya que se ha recolectado bajo sus copas el 65% de la precipitación. Cuando las lluvias son copiosas (en una precipitación de 50 mm) bajo el pino carrasco se ha recogido un 75 % de la precipitación, mientras que en el pino piñonero solo se cuantifico un 71%.

Realizando la estadística comparativa de las observaciones de las dos especies se ha encontrado que no existen diferencias significativas de los promedios de trascolación, sin embargo en los datos obtenidos en cada una de las clases diamétricas muestran diferencias en las distintas clases diamétricas (DBH) $\alpha=0.05$; $p < 0.001$ esto en las dos especies. La diferencia de agua trascolada de acuerdo a la clase diamétrica se ha evidenciado en las estaciones donde se presentaron altas precipitaciones, recolectándose la mayor trascolación en árboles con un diámetro a la altura de pecho menores de 13 cm y los volúmenes menores de este flujo se recolectaron en árboles con un DBH superior a 18 cm (tabla 7).

Clase diametrica	Media(%)	Desv. típ.
0	72,2741	4,89630
1	66,5745	3,91301
2	61,8383	5,37841

Tabla 7. Valores medios del % de trascolación respecto al volumen de precipitación en cada una de las clases diamétrica.

4.4.1 Procesos implicados en la química de la trascolación.

Los procesos capaces de transformar las cantidades y calidades del agua al atravesar el dosel son heterogéneos y estos los podríamos resumir en la figura 19. No es posible aventurar que uno de ellos siempre sea el más importante en el enriquecimiento de la trascolación como señalaron Bellot y Escarré (1988), ya que por lo general, todos actúan en mayor o menor grado. También es importante mencionar que el lugar, el tipo

de bosque, edad, estado fenológico, proximidad a fuente de emisiones atmosféricas, o el propio régimen metereológico pueden hacer que uno de ellos juegue un papel más importante que el resto. De forma general podríamos decir que el flujo de trascolación es rico en iones disueltos.

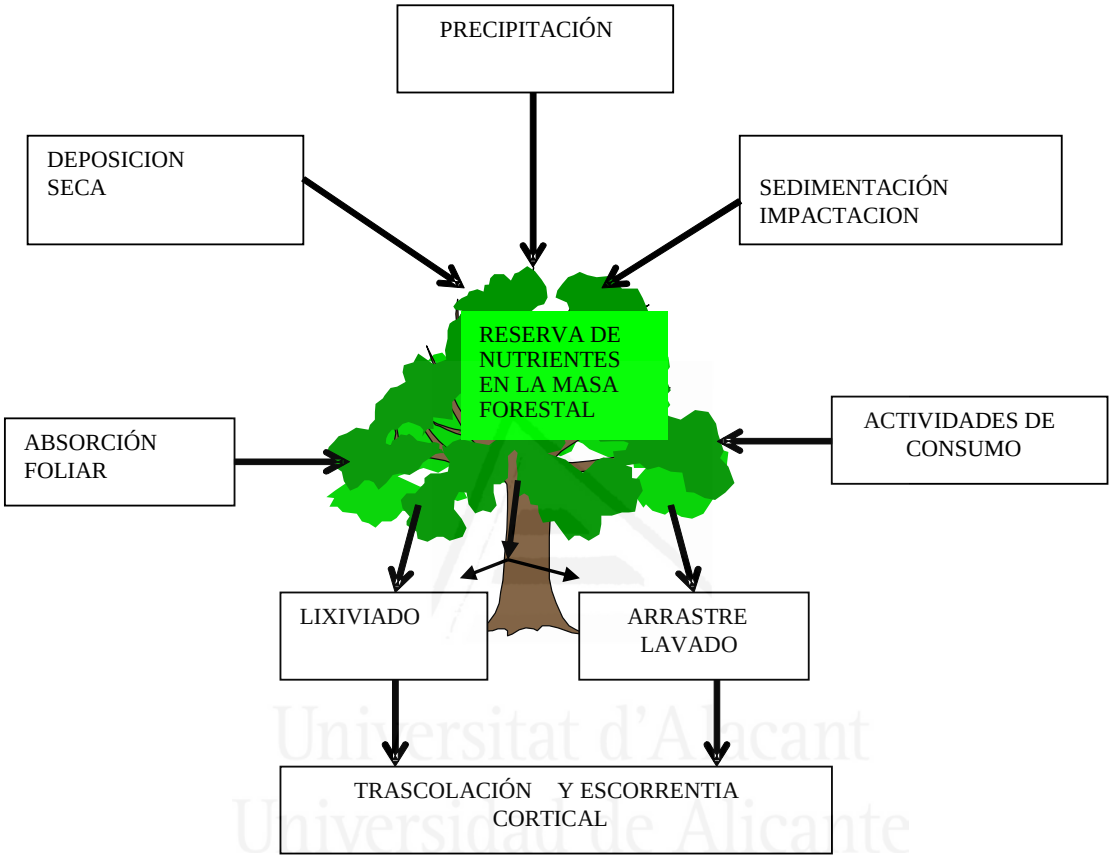


Figura 19. Diagrama de los flujos al nivel de dosel, basado en Parker 1983.

La trascolación junto con la escorrentía cortical son dos vías muy importantes en el transporte tanto de agua como de nutrientes. Los cambios en las concentraciones del agua son muy diversos, por una parte esto nos indicaría el aporte de elementos por la planta o por el contrario la absorción de estos por la vegetación. Cuantificar este intercambio, es muy valioso y necesario, en primer lugar nos permitirá conocer la entrada de nutrientes por la deposición global y en segundo lugar conoceremos la salida de estos

4.4.2 Concentraciones iónicas medias de cada especie.

La tabla 8 muestra las concentraciones medias ponderadas por volumen de cada ion analizado en la trascolación de las dos especies estudiadas en Guardamar del Segura durante todo el periodo de estudio. El calcio y los cloruros son los iones más abundantes, seguidos de cerca por el sodio.

Especie		Ca 2+	Mg 2+	K +	Na +	Cl -	N03 -	S04 -
1,0	N	650	650	650	650	650	650	650
	Media	327	103	58	226	239	73	137
	Desv. típ.	156	42	23	93	102	26	50
2,0	N	650	650	650	650	650	650	650
	Media	336	104	60	229	243	75	140
	Desv. típ.	154,5576	40,0473	19,7416	91,7431	102,5808	22,8536	46,7540
Total								
	Media	332	104	59	227	241	74	139
	Desv. típ.	155	41	21	92	103	25	48

1- Pinus pinea L 2- Pinus halepensis Miller

Tabla 8. Concentraciones medias ponderadas por volumen para cada ion analizado en la trascolación de las dos especies estudiadas en Guardamar del Segura (valores expresados en µeq/l).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Las dos especies presentan en general un alto contenido de iones disueltos en la trascolación, siendo en todos los casos mayor que en la deposición global. La secuencia de las concentraciones iónicas es igual para las dos especies estudiadas y en el siguiente orden: $Ca^{2+} > Cl^{-} > Na^{+} > S04^{=} > Mg^{2+} > N03^{-} > K^{+}$.

Es interesante también observar el porcentaje en que se encuentra cada ion con respecto al total (Fig. 20). De los mayoritarios, el Ca^{2+} supone alrededor del 29% de todos los datos del pinar, el Cl^{-}, llega a más del 20% del total iónico y el Na^{+} supone alrededor del 19%. Estos porcentajes corresponden a valores medios ponderados en las dos especies.

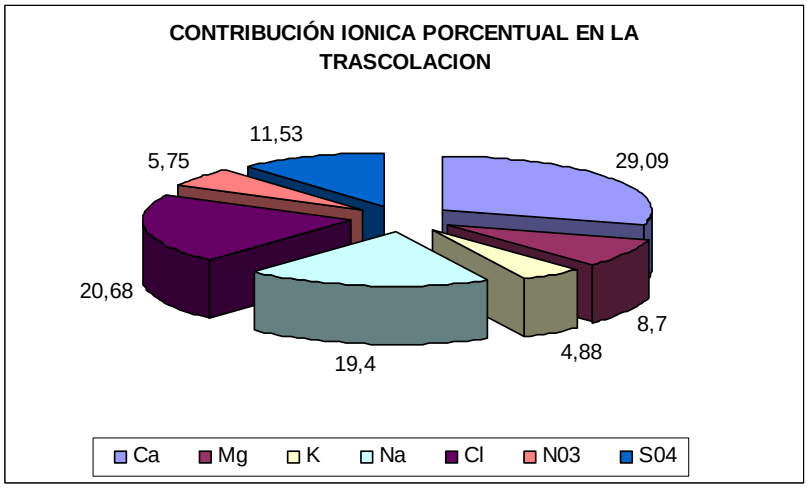


Figura 20. Porcentaje de cada ion respecto al total de las concentraciones de Guardamar del Segura en *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L.

4.4.3 Comparación de las concentraciones medias de la trascolación observadas entre especies y entre tamaños.

Los resultados del análisis de la varianza (ANOVA) de un factor entre las concentraciones medias de los iones de la trascolación en el pino piñonero y pino carrasco están representados en la (tabla 9). En ella se puede observar que no existen diferencias significativas entre las dos especies, por ello para los efectos de este estudio sobre el pinar de Guardamar del Segura podemos aceptar que las concentraciones medias ponderadas de trascolación son similares en las dos especies.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Ion	Sig.
Ca2+	0,334
Mg2+	0,605
K+	0,169
Na+	0,645
Cl-	0,482
N03-	0,462
S04=	0,321

Tabla 9. Resultados de la ANOVA de un factor considerando todos las concentraciones ponderadas por el volumen de la trascolación en las dos especies estudiadas (*Pinus pinea* L y *Pinus halepensis* Miller) con un grado de significación de 0.05.

Las concentraciones medias ponderadas por el volumen tanto en *Pinus halepensis* Miller como en *Pinus pinea* L son similares como se observa en la figura 21, al igual que en la precipitación los iones que presentan una mayor concentración son el calcio, seguidos del cloruro y el sodio. Los valores más bajos en las concentraciones de los iones se obtuvieron para el magnesio, nitratos y el potasio.

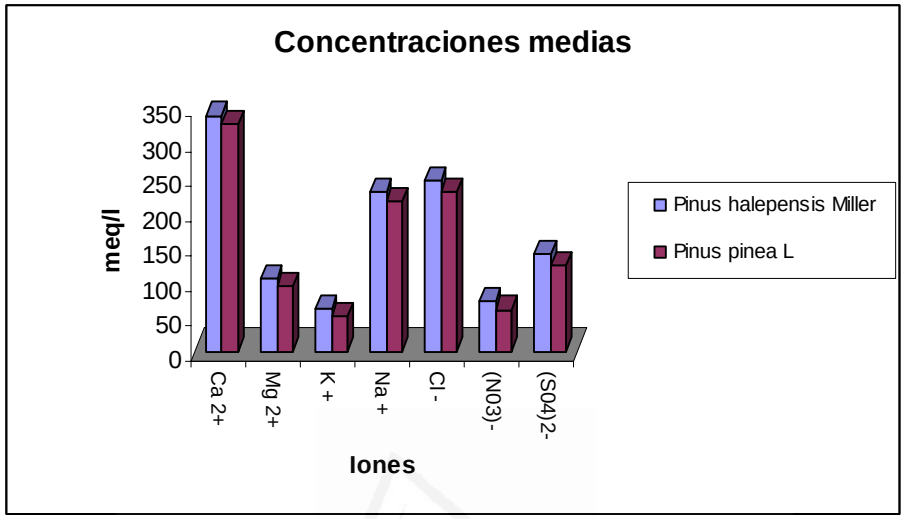


Figura 21. Comparación de las concentraciones medias (µeq/l), ponderadas por el volumen, en el agua de trascolación de las dos especies estudiadas.

4.4.4. Concentraciones netas de trascolación (TrN).

La concentración neta de la trascolación sería la que tendría una disolución imaginaria que contuviese como soluto sólo el aportado por la vegetación y la deposición seca lavada. Esto en la práctica no se puede medir directamente, por lo que se han de seguir métodos indirectos. En nuestra investigación, se ha calculado como la diferencia entre la concentración iónica que se recoge bajo la cubierta vegetal es decir la trascolación (Tr) y la concentración incidente en la deposición global (DG)(Parker, 1983). Este método ha sido empleado en varios trabajos (Escarré y Bellot, 1988 y Domingo, 1991) estos autores coinciden en señalar que es el procedimiento más sencillo y a su vez proporciona una valiosa información de la capacidad que tiene la vegetación para modificar la química de la precipitación. En este modelo, la concentración neta de la trascolación incluiría la parte de elementos lixiviados e interceptados por la planta y no contendría la parte absorbida por la misma, no pudiéndose distinguir entre ellas. Por lo tanto la trascolación neta será igual a:

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

[TrN] = ([Tr]-[DG])

La tabla 10 muestra las concentraciones obtenidas en las dos especies mediante el método descrito por Parker, (1983). En ésta se aprecia que el agua al cruzar la vegetación se enriquece en todos los nutrientes, puesto que todas las diferencias son positivas. Sin embargo, hay que tener presente, que este método de cálculo incluye la parte correspondiente a la intercepción, por lo que las concentraciones netas así calculadas sobreestiman la realidad.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Cl^{-}	$N03^{-}$	$S04^{=}$
Precipitación	227,10	54,60	32,70	188,00	173,90	34,60	113,60
Trascolación neta en *Pinus pinea* L	100,20	48,50	25,70	38,10	50,90	39,00	24,00
Trascolación neta en *Pinus halepensis* Miller	108,60	49,70	27,40	40,50	54,90	40,00	26,70

Tabla 10. Concentraciones netas de trascolación según método Parker, 1983.

Entre las posibles causas de la alteración de la precipitación al atravesar la masa forestal se encuentran: la forma, superficie, textura de las hojas y la forma en que se disponen las ramas y hojas (Adams y Hutchinson, 1987). Estos factores aparentemente lógicos, introducen una enorme complejidad en la investigación. Por ejemplo, podríamos pensar en el tamaño y orientación de la hoja son factores críticos a la hora de la acumulación de partículas y polvo. Algunos autores como White y Tuner (1970) ó Parker (1987), señalan como causa la propia naturaleza del material interceptado por las acículas en la captación de aerosoles y partículas. Domingo (1991), apunta que la textura adherente de las hojas (resina y numerosos capilares) también juegan un papel importante en la dilución y arrastre del material captado. En nuestro estudio a pesar de planteárnoslo no hemos profundizado y nos hemos centrado en conocer las cantidades de nutrientes que llegan al ecosistema por este flujo.

El papel que cumplen los doseles en la modificación de la química de la precipitación ha sido reconocido por Eaton *et al.*, 1973; Parker, 1983 y Lovett, 1994. El enriquecimiento del agua trascolada se debe principalmente a la deposición seca y al lixiviado de los solutos intercelulares, aunque en algunos casos no se produce dicho

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

enriquecimiento debido a procesos de absorción de nutrientes desde el agua de lluvia, por las hojas y la flora o fauna epifita (Carlisle *et al*., 1967; Miller *et al*., 1976; Millbank, 1978; Reiners y Olson 1984; Cronan y Reiners 1983; Boring *et al*., 1988; Rodrigo *et al*., 2001.

4.4.5 Tasas de enriquecimiento iónico (EI).

Las tasas de enriquecimiento iónico (EI), nos permiten deducir, en términos relativos, en que magnitud contribuye cada especie a modificar la química de la precipitación después de atravesar el dosel.

Como se indico anteriormente, son diversos los factores causantes del enriquecimiento del agua de trascolación respecto a la deposición global. En la mayoría de ellos juega un papel importante la vegetación como liberadora de iones de sus propios tejidos o almacenadora de elementos de la atmósfera, a los que previamente ha interceptado por impactación, adsorción y sedimentación (Kelly y Strickland 1986)

Parker (1983), propone el cálculo de un cociente que refleje las tasas de enriquecimiento iónico atribuible al paso por la vegetación. Esta tasa neta se calcula dividiendo la de trascolación neta entre la deposición global. Dado que la **TrN**= **[Tr]- [DG]** la expresión resultante es:

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

EI= ([Tr]- [DG]) / [DG]

Donde:
[Tr] = Concentración ponderada por volumen de la trascolación.
[DG] = Concentración ponderada por volumen de la deposición global.

Los datos que ofrece este índice, se muestran, en la tabla 11 donde los valores de enriquecimiento inferiores a la unidad reflejan que la vegetación aporta estos iones en menor cuantía que lo hace la deposición global, mientras que valores de la tasa de enriquecimiento superiores a la unidad refleja el mayor aporte de esos iones por la copa de los árboles que por la deposición global. Por este motivo, observando la tabla 11 se puede decir que únicamente es más importante el aporte por la vegetación en cuanto al

ión nitrato, pues presenta valores de EI de 1,13 para *P. Pinea* L y 1,16 para y *P. halepensis* Miller. Igualmente, se puede observar que las diferencias en el enriquecimiento que aportan las dos especies estudiadas son mínimas.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Cl^{-}	$N03^{-}$	$S04^{=}$
***Pinus pinea* L**	0,44	0,89	0,79	0,20	0,38	1,13	0,21
***Pinus halepensis* Miller**	0,48	0,91	0,84	0,22	0,40	1,16	0,24

Tabla 11. Tasas de enriquecimiento relativo, del agua lluvia al atravesar la vegetación

Respecto al resto, las mayores concentraciones de estos iones se presentan cuando hay periodos largos sin lluvias. Este mecanismo de liberación a la trascolación de estos elementos no obedece a la difusión sino a la acumulación por la deposición seca (Domingo, 1991), estos iones se acumularían en la vegetación formando sales fácilmente solubles que serían lavadas por las precipitaciones.

El K^{+} que enriquece la trascolación puede obedecer al envejecimiento de las hojas debido tanto a daños físicos como cambios fisiológicos (Eaton, 1973) ó como resultado de las interacciones planta-atmósfera (Gonzales *et al*., 2000). También se ha observado que los máximos valores de concentración de potasio esta asociado a la época de producción de polen de los pinos. El $N0_3^{-}$ es el ion que se enriquece más en este flujo, algunos investigadores como Lovett y Lindberg (1984) coinciden en señalar que esto obedece a una mayor asimilación por los tejidos, mientras Reiner y Olson 1984; Rodrigo *et al*., (2001), apuntan a una absorción por parte de elementos exógenos a la planta como por ejemplo las especies epifitas, en nuestro caso esto no se cumpliría dado que en la pinada de Guardamar del Segura no existen tales especies, pero este enriquecimiento en particular podría asociarse a los abundantes líquenes que las confieras poseen en este sistema.

El mecanismo de intercambio de estos elementos parece ser también el gradiente de concentración, es decir cuando aumenta en TrN disminuye en la lluvia y viceversa. Hemos visto que la correlación de ambos, entre su concentración en TrN y la lluvia es negativa y muy significativa (P=0.000).

Todos los iones presentan enriquecimientos positivos. De igual manera estos presentan mejores correlaciones y significativas con el "número de días secos", lo que afirmaría su procedencia externa probablemente de la deposición seca. Estos iones se encontrarían en la superficie vegetal formando sales fácilmente solubles y serian "lavadas" con el agua de lluvia. Estos resultados positivos en todos los elementos en el agua de trascolación explicarían el enriquecimiento. Queda, en cualquier caso abierto aspectos muy interesantes para futuras investigaciones como es el posible papel de las resinas y de las escasas epifitas de algunos árboles como controladores del paso de determinados iones hacia el interior y exterior de las especies estudiadas.

Los resultados del potasio indican que su origen es interno, es decir se enriquecen con la trascolación de las dos especies estudiadas. El factor predominante de este intercambio no es por el gradiente de concentración como lo vimos anteriormente. La correlación positiva entre la TrN [K^+] y la DG [K^+] indica que se produce un lavado de este elemento de por el agua de lluvia. Una de las posibles causas podría ser el polen de las especies.

4.5 CONCLUSIONES.

- El agua lluvia al ponerse en contacto con la vegetación (*Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L) se enriquece en todos los nutrientes, siendo el nitrato, magnesio y potasio los que presentan los más altos valores.

- Las tasas de enriquecimiento iónico del agua de la trascolación nos han mostrado que no existen diferencias entre las dos especies de pino estudiadas. Entre los factores causantes de esta similitud cabe destacar la forma y textura de las hojas de los árboles.

- Las diferencias de concentración entre el agua de precipitación y la trascolación es un factor importante para conocer el papel que cumple la vegetación en la modificación química del agua de este flujo.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

- La cantidad de precipitación es el principal factor que determina el flujo de trascolación, ya que la intensidad y la duración tienen un efecto sobre los volúmenes.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPITULO V
ESCORRENTÍA CORTICAL

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5.1 INTRODUCCIÓN.

A partir de la década de los 60, Carlisle *et al*., (1967) ponen en evidencia la importancia que tienen para los ecosistemas forestales los nutrientes que llegan al suelo por medio la escorrentía cortical. A pesar de que esta vía supone la circulación de poca cantidad de agua, si la referimos a la superficie o si por el contrario la comparamos con otro tipo de vías, representa generalmente altos aportes de nutrientes (Herwitz 1986). Por tanto, todo el volumen de agua y de elementos contenidos en ella se concentra en una superficie muy pequeña, del orden de unas pocas decenas de cm^2 (Carlisle *et al*., 1967; Aussenac, 1970; Abee y Lavender, 1972; Belmonte y Romero, 1999), área que además suele tener la mayor densidad de raíces. Gesper y Holowaychuck (1971), dicen tanto la trascolación como flujo disperso y la escorrentía cortical como flujo concentrado, influyen en la variabilidad espacial de las propiedades químicas y físicas de las superficies boscosas.

Bellot (1989) describe el flujo de la escorrentía cortical como un modelo en el que las copas de los árboles actúan como verdaderos embudos que recogen agua y nutrientes, que posteriormente son canalizados a través del tronco y llegan a una superficie muy reducida del suelo.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La concentración de nutrientes en la escorrentía cortical suele ser alta, pero su importancia con respecto a la trascolación es baja, ya que normalmente sólo una pequeña parte del agua sigue esta vía. La cantidad de lluvia necesaria para que empiecen la trascolación o la escorrentía cortical, varía dependiendo de la estructura aérea de la vegetación (Terradas 2001).

El arrastre de elementos producto del lavado de las ramas y troncos una vez depositados en el suelo suelen provocar cambios físicos y químicos en este (Kellman 1979; Kelly y Strickland 1987). Las plantas, ya sean árboles o no, compiten por estos nutrientes en el suelo forestal (Bellot 1988), siendo los propios individuos que generan estos aportes, por tanto los más beneficiados al captar gran parte de ellos. Sin embargo otros individuos podrían competir por estos recursos, situándose en las proximidades, o desarrollando sistemas radiculares que les permitan alcanzar estas zonas (Henright 1987). Este mismo autor citando a Lamont (1982), indica la existencia de estructuras radiculares llamadas proteoides, que se sitúan en el suelo inmediatamente debajo de la

hojarasca, y constituyen una extensa área superficial de raíces finas, con una enorme capacidad de captar los nutrientes que cruzan este perfil a gran velocidad.

El estudio del flujo de la escorrentía cortical se puede plantear desde dos perspectivas:

Tomando el bosque en su conjunto y muestreando un número determinado de individuos (elegidos en base a parámetros como densidad o distribución de clases diamétricas) y extrapolando los resultados al conjunto del bosque. Este enfoque presenta el inconveniente de su debilidad predictiva, ya que está condicionada por la estructura interna del bosque.

Estudiando el árbol como entidad propia, lo que se denomina "árbol-unidad" (Bellot, 1989), relacionando el flujo de la escorrentía cortical como forma y tamaño de la copa; diámetro del tronco (DBH) (Ford y Deans, 1978; Pehl y Ray, 1984) con la estructura, así como el ángulo de inserción de éstas con el tronco (Szabó, 1985) e incluso el estado fonológico de la especie vegetal, Brinson et al., 1980). Los resultados permiten conocer con más profundidad la capacidad de cada especie en concreto, en la captación y canalización de la lluvia (Domingo, 1991).

Nuestro trabajo se basa en el segundo enfoque, del "árbol unidad", ya que nuestro ecosistema tiene una distribución por clases diamétricas ampliamente estudiadas por Garcia, 2005, esto nos permitiría conocer en detalle los nutrientes que llegan al bioma por este flujo.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5.2 OBJETIVOS.

5.2.1 General.

Determinar las características de algunos iones presentes en la escorrentía cortical.

5.2.2 Específicos.

- Cuantificar las concentraciones de calcio, magnesio, potasio, sodio cloruros, nitratos y sulfatos que llegan al suelo por esta vía.

- ❖ Calcular las tasas de enriquecimiento de la escorrentía cortical.

5.3 MATERIAL Y METODOS.

5.3.1 Muestreo de la escorrentía cortical.

Para determinar los volúmenes y tomar alícuotas de la escorrentía cortical para su posterior análisis químico, se instalaron un total de 50 colectores distribuidos en las dos especies y para cada una de las clases diamétricas descritas en la tabla 7. Cada colector constaba de un canal de goma adherido al tronco del árbol (Fig. 22), colocado a 50 cm del suelo. Este canal rodeaba al tronco con una ligera inclinación que permitía que el agua escurrida por el tronco llegara a un bidón de 8 litros de capacidad. Es importante comentar que previamente a todo este montaje se realizó un lijado en la parte superficial del tronco para lograr una mejor adherencia de la manguera a la superficie.

Figura 22. Dispositivo de recolección de agua de escorrentía cortical.

Los volúmenes de escorrentía cortical se han calculado utilizando la relación entre la cantidad de agua recolectada en cada árbol y la obtenida en la totalidad de la parcela de recolección de acuerdo a (Aboal *et al*., 1999 y UNECE, 2004). La ecuación empleada fue la siguiente:

Ec = Ar/ba x BA/A

Donde:

Ec = Escorrentía cortical en (mm)

Ar = Volumen de agua promedio recolectada en individuos muestreados (en L).

ba = Área basal promedio de los árboles muestreados (en m^2)

BA = Sumatoria del área basal del total de árboles de la parcela de experimentación (en m^2)

A = Área de la parcela de experimentación (en m^2)

La primera parte de la ecuación (Ar/ba) representa la escorrentía cortical por individuo, mientras que la segunda (Ba/A), incorpora el valor para representar la Ec de la parcela.

Otro de los factores importantes a tener en cuenta en la escorrentía cortical es el índice de canalización. En nuestro caso se ha utilizado el índice propuesto por Chuyong, *et al.*, 2004 y Levia (2004) donde:

FR= Ec/ (ba)*(P)

FR= Índice de canalización.

Ec= Escorrentía cortical.

ba= Área basal del árbol medido (m^2).

P= Volumen de precipitación.

Este índice es un indicador de la eficiencia que tienen los árboles para concentrar la Ec por lo que nos permitirán conocer con más profundidad la capacidad que tiene cada especie en concreto, en la captación y canalización del agua de precipitación.

A fin de destacar la importancia que presenta la estructura de las especies estudiadas hemos calculado los índices de canalización (FR), ya que este índice esta relacionado con la posición de las ramas, su ángulo de inserción al tronco, y su capacidad de concentrar y conducir el agua de la lluvia a través de su corteza.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5.4 RESULTADOS.

5.4.1 Análisis de los volúmenes de escorrentía cortical.

En la tabla 12 se muestra los volúmenes medios y totales (en mm) recogidos en este flujo en las dos especies estudiadas (*Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L) en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura a lo largo de los dos años de investigación. En ésta se aprecia que al existir una mayor precipitación los volúmenes de Ec aumentaron en las dos especies siendo ligeramente mayor en *Pinus halepensis* Miller respecto de *Pinus pinea* L.

Año	Especie	Precipitación (mm)	Vol. Medio (mm)	Porcentaje (%) medio de Ec	Vol. Total (mm)
2002*	*P.halepensis* Miller	76,00	2,61	18,30	13,91
	P.pinea L	76,00	2,37	16,64	12,64
2003	*P.halepensis* Miller	267,00	3,79	17,00	45,40
	P.pinea L	267,00	3,37	14,93	39,87
2004*	*P.halepensis* Miller	118,00	4,21	16,62	19,62
	P.pinea L	118,00	3,91	14,78	17,44

Tabla 12. Volumen medio y total de la escorrentía cortical de las dos especies estudiadas (junio 2002 al 23 de mayo de 2004). *Años de muestreo incompletos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En la figura 23 se muestra la precipitación incidente sobre los volúmenes de agua que llegan al suelo por la trascolación y la correntía cortical durante el periodo de estudio. De las dos especies estudiadas *Pinus halepensis* Miller presento el mayor volumen de escurrimiento cortical 17,3% y *Pinus pinea* L presentó un 15,45% sobre el total de l/m^2 medidos en la precipitación.

Los valores porcentuales de la escorrentía cortical obtenidos en el pinar de Guardamar del Segura son muy variados, pero sin embargo un poco mayores respecto a los encontrados en bibliografía consultada. Por ejemplo Cantu y Gonzales (2001) en *Pinus pseudostrobus* Lindl estiman que por Ec llegan al suelo un 12% del total de la precipitación, mientras que Pehl y Ray (1984) estiman este flujo en un 1,1 % del total del volumen total de precipitación en una plantación de *Pinus tadea* en Texas. Un porcentaje menor (0,6%) lo obtienen Prebble y Stirk (1980) para *Eucalyptus melanophloja*. Foster y Gesel (1972) registran valores de 4% para la escorrentía cortical

de *Pinus banksiana*. Domingo (1991) observa valores de Ec de 12,3 % en *Pinus nigra* y 4,4% en *Pinus Pinaster*. Rolfe *et al* (1978) indica para diferentes tipos de Quercus, una escorrentía cortical del 12,4% del total de la precipitación. George (1979) obtiene valores de 8% en eucaliptus. Bellot (1989) observo un 9% de Ec del total de la lluvia en encinas, sin embargo Xiaoniu *et al*., 2005 encuentra valores de Ec de 30,9% para *Castanopsis sieboldii*. Slatyer (1965) obtiene valores hasta el 40% de escorrentía cortical para *Acacia aneura*. Toda esta gran diversidad de trabajos aplicados a la dinámica de agua en la vegetación, nos enseña la gran importancia que tiene este flujo dentro un ecosistema.

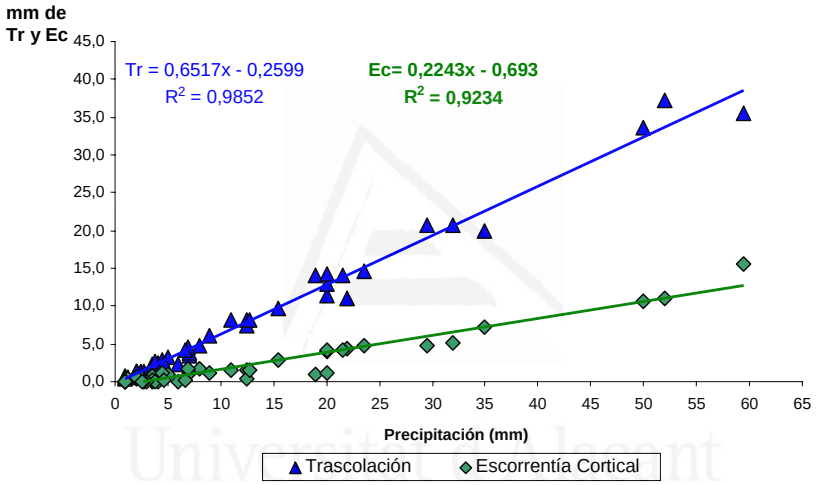


Figura 23. Relación general entre la precipitación diaria, el volumen de trascolación y escorrentía cortical.

La mayor capacidad de generación de escorrentía cortical, como advertíamos anteriormente puede estar relacionado con varios factores estructurales: por una parte y quizás el más importante, el ángulo de inserción de las ramas en el tronco, lo que permite reconducir el agua al fuste. Este favorecería a las dos especies estudiadas, aunque parece presentar una mejor inclinación de las ramas de *Pinus halepensis* Miller dado los valores presentados de correntía cortical. Sin embargo en menores proporciones al *Pinus pinea* L pues sus ramas están poco inclinadas. Por otra al presentar las dos especies una copa (forma ovalada o piramidal), puede influir en la cantidad y distribución de agua que desciende del dosel al tronco (Schroth *et al*., 1999), ésta seria la posible explicación de las altas tasas de escorrentía cortical presentadas en

las dos especies. El “porte de los individuos también influye en el flujo, ya que cuanto mayor era éste mayor volumen de agua se recogía.

Varios autores han puesto en evidencia el efecto que puede tener los factores estructurales en la escorrentía cortical, Domingo (1991) encuentra que las ramas de pino laricio tienen un mayor ángulo de inserción en comparación con el pino rodeno. Ibarra y Echeverría (2004) atinan que el tipo de hoja y rugosidad en el tronco hace variar las cantidades de escorrentía fustal.

Es lógico pensar que el área de proyección de la copa vegetal sea un parámetro de canalización de agua lluvia por las ramas y el tronco, ya que la copa aumentaría la capacidad de captación de agua, por lo tanto a mayor DBH habría una mayor escorrentía cortical. Esta hipótesis se cumple para algunas especies como en el caso de Pino laricio y algunas especies de matorral (Domingo, 1991). Bellot (1989) también observa esta correlación positiva en un encinar. En nuestro estudio esta suposición no se cumplió, por el contrario, las dos especies (pino piñonero y pino halepo) mostraron que el volumen recogido es menor cuanto mayor es el individuo, así por ejemplo la mayor cantidad de escorrentía cortical se presenta en pino carrasco de clase diamétrica 0 (<13 cm de DBH) con un 15,5% del total de la precipitación en comparación a los valores registrados en la clase 2 (>18 cm de DBH) de pino piñonero con un 10,4% del total de la lluvia.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

5.4.2 Índice de canalización

Se ha estimado los índices de canalización en las dos especies a fin de relacionar los volúmenes recolectados con el área equivalente de recolección del tronco y la precipitación. Índices superiores a la unidad indican que las ramas del individuo han concentrado efectivamente una cantidad de agua y por ende harán un mejor lavado de sustancias acumuladas en el fuste. Es decir en otras palabras es un indicador de eficiencia de escorrentía cortical en el árbol.

Los índices estimados para ambas especies, enseñan resultados bastante interesantes. Por una parte la mayor eficiencia de canalización del pino halepo, frente a al pino piñonero, aunque con un coeficiente de variación superior a 300 % (tabla 13); por otra

parte, los índices de canalización entre las clases diamétricas estudiadas muestran que existen diferencias significativas (α=0,05%; P<0,6654) entre cada una de estas. Los valores de FR observados en Guardamar del Segura son bajos respecto a los observados en el mismo genero por otros autores (Chuyong *et al*., 2004; Levia, 2004), que trabaja en zonas donde las precipitaciones son mayores a las de nuestra zona de estudio.

Especie	*Pinus pinea* L			*Pinus halepensis* Miller		
Clase diamétrica	0	1	2	0	1	2
Rango	0.03-211.5	0.01-112.3	0.01-32.0	0.03-387.2	0.01-73.4	0.01-44.2

Tabla 13. Rangos de los índices de canalización de *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L.

5.4.3 Química de la escorrentía cortical

Las concentraciones medias se obtuvieron ponderando la concentración de cada evento y en cada individuo por el volumen que recogió. Con este cálculo lo que obtendremos es un valor de concentración media propio para cada especie, comparable con los valores obtenidos en la trascolación. Posteriormente deducimos las concentraciones ponderadas por el volumen y por el número de individuos de cada clase diamétrica, lo que nos permitió hacer una estimación de los aportes iónicos producidos por esta vía en el ecosistema. Las concentraciones medias del agua de escorrentía cortical en las dos especies estudiadas al igual que la trascolación, muestran que el ion calcio ha sido el de mayor concentración, seguido del sodio y por ultimo el cloruro como se observa en la tabla 14.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Especie		Ca^{+2}	Mg^{+2}	K^{+}	Na^{+}	Cl^{-}	$(N03)^{-}$	$(S04)^{-2}$	pH	Cond
P.pinea L	N	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00		
	Media	369,16	126,89	70,28	290,26	279,35	100,51	161,15	6,34	275,30
P.halepensis Miller	N	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00		
	Media	347,98	112,85	67,30	251,69	252,06	83,83	151,06	6,68	253,40

Tabla 14. Concentraciones medias ponderadas por volumen de la escorrentía cortical en las dos especies a lo largo de todo el periodo de muestreo (expresadas en µeq/l). N representa el número de datos.

Los porcentajes en que se encuentra cada ión con respecto al total de cationes y de aniones es similar a los encontrados en la trascolación, como se aprecia en la figura 24 el anión mayoritario es el calcio con un 26,96%. El ion sodio supone un del 20,33% del total de cationes encontrados en la escorrentía cortical. Los iones cloruro y sulfato se encuentra en porcentajes de 19,98% y 11,75%. El porcentaje menor se ha encontrado en el potasio con un 5,16%.

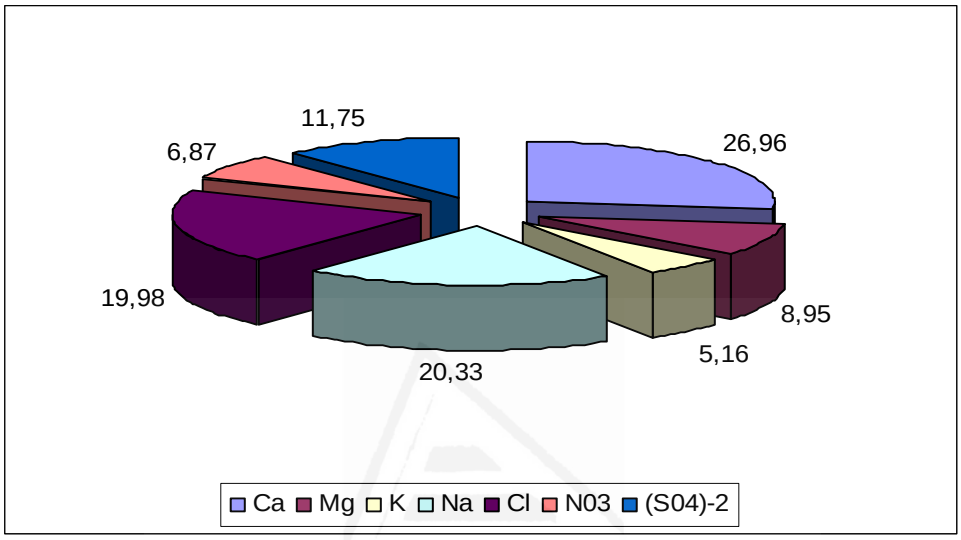


Figura 24. Porcentajes de cada ion con respecto al total de los cationes y aniones.

El resultado de aplicar el análisis de la varianza (ANOVA) para las concentraciones medias de las especies estudiadas (*Pinus pinea* L y *Pinus halepensis* Miller), nos indica que existen diferencias altamente significativas (α=0.05%; P< 0.038) entre las concentraciones químicas de los flujos de escorrentía cortical de las dos especies. Las diferencias abarcan todos los iones analizados.

Estos resultados no difieren a los encontrados por Rolfe *et al*., (1978); ni Domingo (1991), pero si a los de Bellot (1989) quien encuentra diferencias significativas en algunos de los iones (sulfato, calcio y potasio) analizados en Quercus ilex. Todos ellos coinciden en señalar que esto obedece fundamentalmente a una alta variabilidad estacional relacionada a su vez a diferentes estados fenológicos de la planta. Otros autores señalan que las coniferas tienden a recoger mas deposición seca que los bosques caducifolios debido a su mayor superficie foliar (Chapin *et al*., 2002).

5.4.4 Química de la escorrentía cortical por clase diamétrica.

La cantidad de agua canalizada por los troncos de los árboles es función alométrica del diámetro del árbol. La bibliografía consultada aporta múltiples comprobaciones de esta relación, es decir al aumentar los árboles de diámetro, aumenta la cantidad de agua canalizada por este flujo. Sin embargo, el tipo de relación entre el diámetro y la relación iónica en el agua de la escorrentía fustal no es patente, (Jordán 1978; Baker y Attiwill 1987).

Son diversos los procesos o factores que intervienen en esta relación: unos físicos y químicos como el aumento de la dilución, la mayor capacidad de lavado por el agua que corre a través del tronco lo cual conlleva a un arrastre de lixiviados y deposición seca (Terradas 2001); otros biológicos como la mayor exudación derivada de una mayor superficie intercambiante y la posibilidad de más fauna y flora epífita (Bellot 1989).

Las dos especies estudiadas reflejan el efecto del tamaño o edad en la concentración de los iones. Al disponer de 50 pinos agrupados en diferentes clases diamétricas, se observa que los valores medios ponderados por volumen de cada ion (tabla 15). También se aprecia un comportamiento diferente en cada uno de los tamaños de árbol analizados, con una pauta muy clara en algunos de los iones, en la que a medida que aumenta el diámetro basal del individuo aumenta su concentración tanto para *Pinus pinea* L como para *Pinus halepensis* Miller. Las diferencias más significativas (α=0.05%; P=0,000) se presentan en sulfatos, nitratos, potasio y magnesio en las dos especies.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Concentraciones medias de Ec ponderadas por volumen

Especie	clase diamétrica		Ca	Mg	K	Na	Cl	N03	S04
***Pinus pinea* L**	0,00	N	189,00	189,00	189,00	189,00	189,00	189,00	189,00
		Media	351,62	114,81	57,58	270,30	258,81	88,43	146,63
	1,00	N	184,00	184,00	184,00	184,00	184,00	184,00	184,00
		Media	382,92	128,79	70,58	300,68	291,29	100,81	165,11
	2,00	N	152,00	152,00	152,00	152,00	152,00	152,00	152,00
		Media	374,30	139,61	85,73	302,47	290,44	115,15	174,40
	Total	N	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00
		Media	369,16	126,89	70,28	290,26	279,35	100,51	161,15
***Pinus halepensis* Miller**	0,00	N	189,00	189,00	189,00	189,00	189,00	189,00	189,00
		Media	328,12	100,35	54,51	235,24	234,70	69,90	135,31
	1,00	N	168,00	168,00	168,00	168,00	168,00	168,00	168,00
		Media	347,12	111,45	66,50	250,82	252,40	82,80	150,74
	2,00	N	168,00	168,00	168,00	168,00	168,00	168,00	168,00
		Media	371,18	128,32	82,50	271,06	271,24	100,54	169,10
	Total	N	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00	525,00
		Media	347,98	112,85	67,30	251,69	252,06	83,83	151,06

Tabla 15. Concentraciones medias ponderadas por el volumen de acuerdo a la clase diamétrica estudiada (expresadas en µeq/l).

5.4.5 Concentraciones netas [EcN].

Al igual que vimos en la trascolación, podemos calcular las concentraciones netas de este importante flujo para cada una de las especies estudiadas. La concentración neta de la escorrentía cortical sería aquella que tendría una disolución imaginaria que contuviese como soluto sólo el aportado por la vegetación y la deposición seca, al escurrir el agua de lluvia por las ramas y tronco.

La concentración neta se calculó como la diferencia entre las concentraciones iónicas medias de la escorrentía cortical y la concentración incidente en forma de deposición global, según la expresión:

[EcN] = [Ec] -[DG]

Donde:

[EcN] = Concentración neta de escorrentía cortical

[Ec] = Concentración de la escorrentía cortical

[DG]= Concentración de la deposición global

Vol= Volumen

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Este modelo según Domingo (1991), es el idóneo para el cálculo de las concentraciones netas en escorrentía cortical, en el sentido de obtener información de la trasformación química del flujo de la lluvia al conectar con las ramas y tronco vegetal.

En la tabla 16 se presentan las concentraciones netas calculadas según este modelo, el cual supone que por cada unidad de volumen que se recoge en el escurrimiento, éste no sufre perdidas (de volumen) en su vía a lo largo del árbol y por tanto podremos comparar la carga iónica con la que inicialmente entro en la precipitación, por ello multiplicamos el volumen de la concentración de la deposición global por el volumen de la escorrentía cortical. Hemos de aclarar una vez más que estos métodos nos proporcionan la concentración de éste flujo sin distinguir la parte de materia lixiviada y/o interceptada o absorbida por la planta.

	Ca 2+	Mg 2+	K +	Na +	Cl -	(N03)-	(S04)2-
Precipitación	227,10	54,60	32,70	188,00	173,90	34,60	113,60
***Pinus pinea* L**	142,06	72,29	37,58	102,26	105,45	65,91	47,55
***Pinus halepensis* Miller**	120,88	58,25	34,60	63,69	78,16	49,23	37,46

Tabla 16. Concentraciones netas en la escorrentía cortical (valores expresados en µeq/l).

5.4.6 Tasas de enriquecimiento (E).

Las tasas de enriquecimiento (E) relativas, se calcularon siguiendo el anterior método descrito por Domingo (1991), dividiendo la diferencia de concentraciones entre [Ec] y [DG] por la concentración en deposición global [DG]:

$E = ([Ec] - [DG]) / [DG]$

La tabla 17 enseña los valores de estas tasas en donde se observa diferencias tanto interespecíficas como intraespecíficas. Las dos especies se enriquecen en todos los iones analizados (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Cl^{-}, $N03^{-}$ y $S04^{=}$).

En las diferencias interespecíficas, destaca que la precipitación aporta el mayor contenido en los iones nitrato, potasio y magnesio en *Pinus pinea* L que en *Pinus halepensis* Miller.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

	Ca 2+	Mg 2+	K +	Na +	Cl -	(N03)-	(S04)2-
***Pinus pinea* L**	0,63	1,32	1,15	0,54	0,61	1,90	0,42
***Pinus halepensis* Miller**	0,53	1,07	1,06	0,34	0,45	1,42	0,33

Tabla 17. Tasas de enriquecimiento relativo (E) en la escorrentía cortical, según el modelo $E = ([Ec] - [DG]) / [DG]$.

La variabilidad observada en los volúmenes y en las concentraciones de la escorrentía cortical de las dos especies de pino estudiadas en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura pudo deberse a que el fuste de algunos árboles no eran rectos y el goteo del escurrimiento se presentó gran parte de las ramas, convirtiéndose este escurrimiento en

precipitación directa. También la corteza de las dos especies eran bastante agrietada lo que facilitaba la acumulación de nutrientes, máxime cuando se presentaban temporales.

5.5 CONCLUSIONES

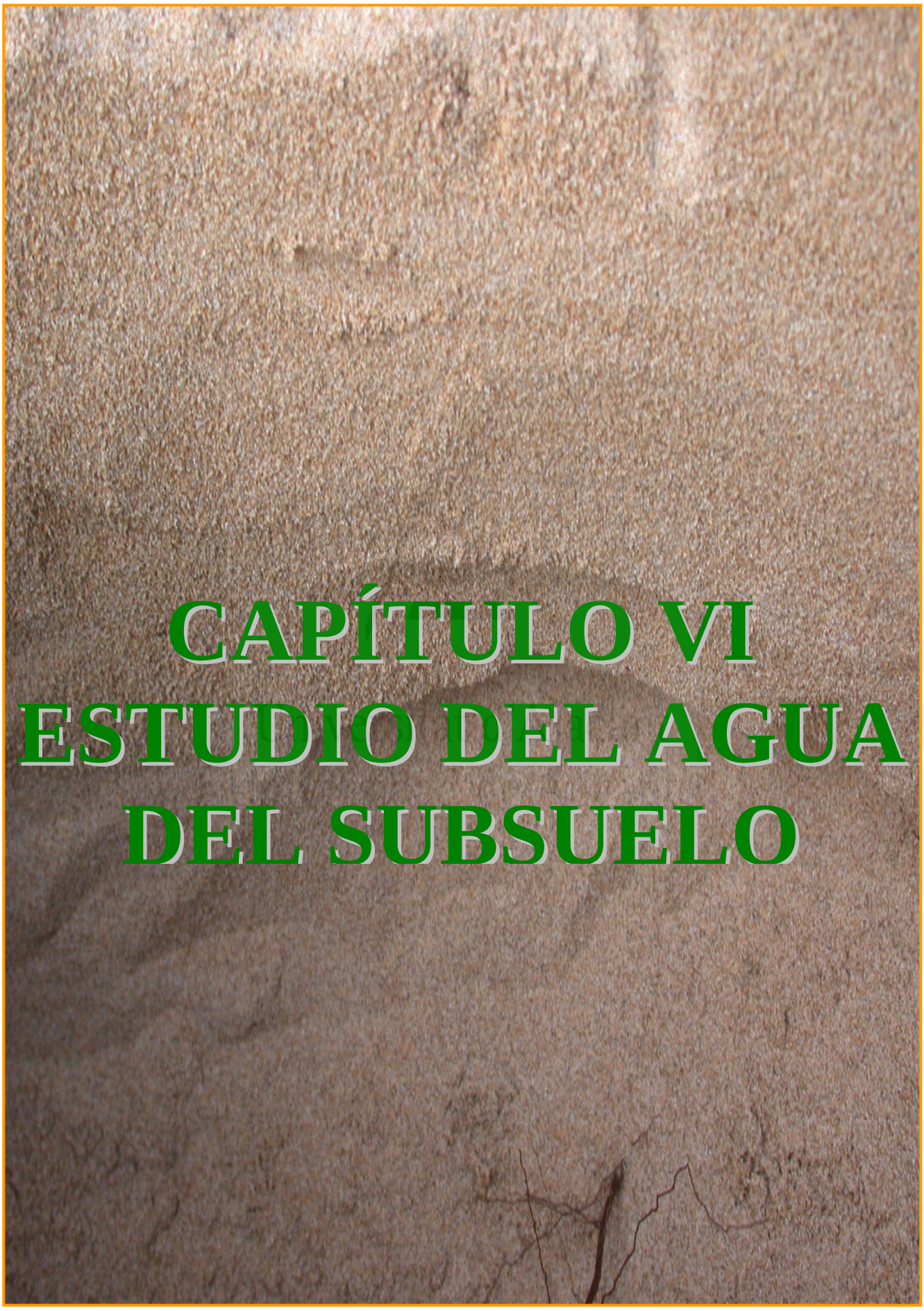
- La escorrentía cortical representó porcentajes pequeños del total de la precipitación durante todo el periodo muestreado, valores que oscilaron entre el 14,78 y 18,30 % en las dos especies.

- La escorrentía cortical en las dos especies de pino estudiadas parece estar relacionada con factores estructurales, como son la altura de los individuos, área basal y ángulo de inserción de las ramas en el tronco.

- Al igual que la deposición global y la trascolación, los iones más abundantes en la escorrentía cortical son el calcio, sodio y cloruro. Los menos concentrados son potasio y los nitratos.

- Pese a no haber diferencias significativas en las dos especies estudiadas, las mayores tasas de enriquecimiento en la escorrentía cortical las presentó *Pinus pinea* L.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



CAPÍTULO VI
ESTUDIO DEL AGUA DEL SUBSUELO

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.1. INTRODUCCIÓN.

El suelo es un medio muy complejo y heterogéneo con propiedades físico-químicas y biológicas que, por separado o con sus tantas interrelaciones, ejerce influencia sobre las relaciones suelo-agua y sobre el crecimiento de las plantas. El agua en el suelo tiene una importancia considerable; Por una parte interviene en la nutrición de las plantas, directa e indirectamente, además actúa como vehículo de los elementos nutritivos disueltos.

El agua presente en el suelo puede proceder de la precipitación y de aportes subterráneos. La presencia de agua subterránea requiere ser evaluada tanto en cantidad calidad como parte de almacenamiento en el espacio geológico. Por lo tanto estas características son de gran importancia vista de la perspectiva de la sostenibilidad de la masa forestal de este tipo de ecosistemas.

En general las zonas semiáridas presentan numerosos problemas debido a la escasez de recursos fundamentales para la vegetación, especialmente agua y nutrientes (Maestre, 2002). El contenido de agua en el suelo refleja el riesgo de estrés hídrico para la vegetación, en particular, y para los ecosistemas en general (Martínez *et al*., 2001). Por lo tanto delimitar los horizontes de humedad en el suelo dunar nos permitirá conocer las reservas de agua disponibles para las plantas. De igual manera indagar sobre la química del nivel freático contribuirá a establecer el origen del agua y de nutrientes del ecosistema. La investigación de estos aspectos fundamentales no solo en la productividad sino en la sostenibilidad de las dos especies arbóreas nos permitirá aportar conocimientos claves sobre el funcionamiento del sistema y además permitirá en el futuro tomar decisiones desde el punto de vista de la gestión y conservación del medio dunar.

En el presente trabajo el estudio del nivel freático se ha abordado empleando diferentes métodos. En primer lugar usamos un método mecánico que nos permitió estudiar la profundidad del nivel, tomar muestras para conocer las características hidroquímicas. Este método es costoso y destructivo, pero ha permitido parametrizar los sondeos eléctricos verticales (S.E.V). Con estos sondeos eléctricos se ha podido determinar la distribución vertical de humedad en el ecosistema. Con un método no destructivo, y más rápido que los sondeos mecánicos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.2 OBJETIVOS.

6.2.1 General.

El objetivo general de este capítulo es estudiar la distribución de humedad y conocer algunas características hidroquímicas del nivel freático del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

6.2.2 Específicos.

- Conocer la profundidad del nivel freático mediante sondeos mecánicos.
- Determinar la distribución vertical de humedad en el sistema utilizando métodos geofísicos.
- Delimitar los espesores y profundidades de los estratos del suelo dunar mediante sondeos eléctricos verticales (S.E.V).
- Conocer algunas características químicas del agua subterránea.
- Observar si las variaciones del nivel freático corresponden a un estimulo externo (Precipitación).
- Definir los orígenes de la salinidad del nivel freático.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.3 MATERIAL Y METODOS.

6.3.1 Sondeos mecánicos.

El método mecánico utilizado para la perforación de los cinco pozos ubicados en el ecosistema dunar fue la percusión por cable, técnica de perforación lenta que se puede adecuar a cualquier sustrato, aunque en rocas duras las velocidades de avance pueden ser del orden de 1 metro por día o menos. Los equipos trabajan con barrenas de alto tonelaje que disgregan la roca mediante el golpeo alternativo de la barrena o trepano suspendido del cable, el detritus producido se extrae por medio de una válvula que se introduce hasta el fondo del pozo. Las ventajas de ser más sencillo y de más fácil

aplicación para casi cualquier tipo de roca, desde una roca dura (como una caliza) hasta una roca blanda (como una arenisca del Terciario).

La máquina de perforación a percusión consta primordialmente de un motor diesel que proporciona un movimiento a una pieza denominada balancín, que a su vez transmite ese movimiento por medio de un cable y por sucesivas poleas, a la herramienta de corte, que cae libremente, ayudada por la varilla de carga (o barrón) que proporciona un peso adicional de varias toneladas al trépano, ya de unos 1000kg, encargado de triturar la roca.

En abril del año 2002, comenzó la perforación de 5 sondeos mecánicos en diferentes puntos de la pinada (figura 25), siguiendo dos transectos perpendiculares al mar, para la construcción de estos se empleo el método de percusión con cable con el equipo SCHOTT DUBON 1095 LDR como se muestra en la figura 26. Seguidamente se procedió a realizar el entubado simple con cloruro de polivinilo (p.v.c) de diámetro 20cm (figura 27), posteriormente se coloco una rejilla tipo Jonson protegidas por filtro de gravas.

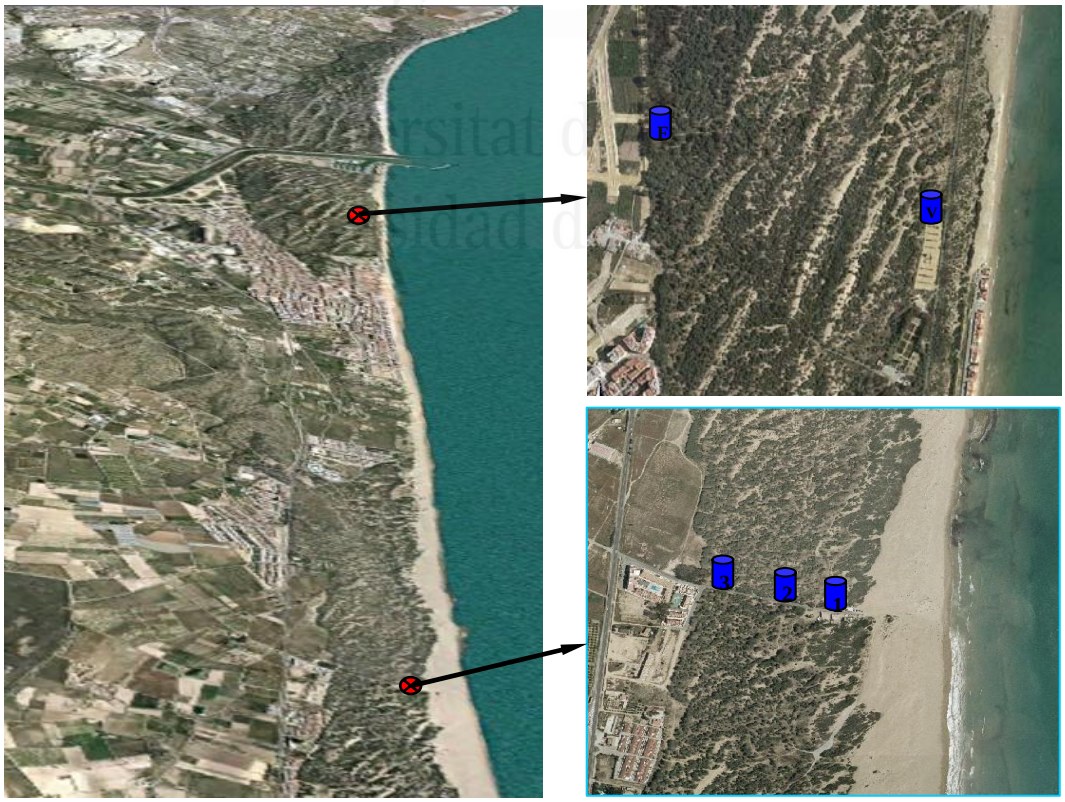


Figura 25. Ubicación de los perfiles mecánicos, arriba derecha sondeos Vivero-Fonteta (V y F) y abajo derecha sondeos Salidero (salidero1, salidero2 y salidero3).

Figura 26. Maquina de perforación con cable SCHOTT DUBON 1095 LDR.

Este tipo de sondas de percusión o cable de la figura 26 son las únicas que permiten medir la aparición del agua subterránea según el avance de la perforación.

Figura 27. Entubado del pozo y protección del mismo.

En los sondeos mecánicos los niveles freáticos y coordenadas obtenidos en cada uno de los pozos están representados en la siguiente tabla:

pozo	Nivel freático (m)	Coordenadas	
Salidero 1	4	38º02’84.1 N	0º39’193W
Salidero 2	7,10	38º02’852 N	0º39’280W
Salidero 3	8,60	38º02’870 N	0º39’35W
Vivero	1,95	38º05’945 N	0º38’800W
Fonteta	4,95	38º06’066 N	0º39’261W

Tabla 18. Niveles freáticos y coordenadas geográficas de los pozos.

6.3.2 Sondeos eléctricos verticales (S.E.V).

Tomando en consideración la profundidad de investigación necesaria para el estudio de los cortes del terreno se utilizó para el caso de la variante de sondeo eléctrico vertical, se uso un dispositivo lineal (Fig 28) de zona de exploración central Schlumberger (Orellana, 1982), con la progresión de aberturas en la línea de alimentación AB como se muestra en la tabla 19, garantizándose una profundidad de investigación adecuada a la tarea técnica trazada.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

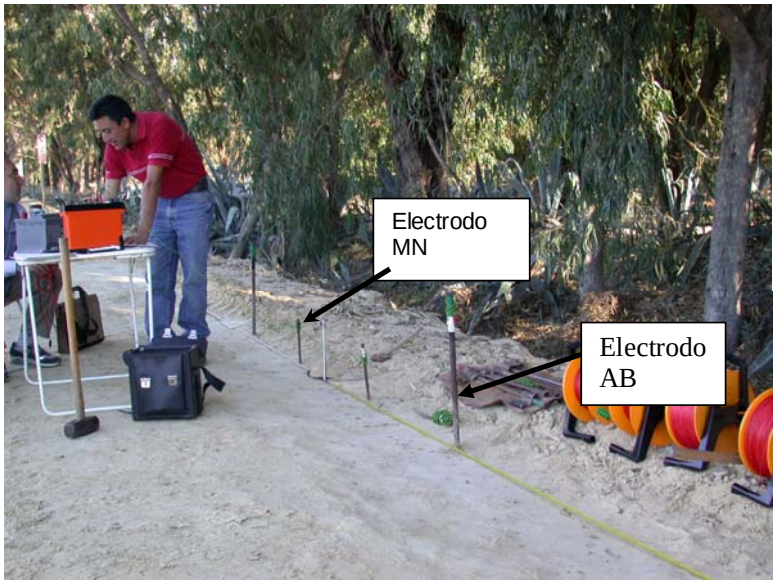


Figura 28. Dispositivo empleado en la ejecución de los SEV

Nº observ.	AB/2 (m)	MN/2 (m)
1	1,5	0,5
2	1,84	0,5
3	2,26	0,5
4	2,78	0,5
5	3,41	0,5
6	4,19	0,5
7	5,14	0,5
8	6,31	0,5
9	7,75	0,5
10	9,51	0,5
11	11,7	0,5
12	14,3	0,5
13	17,6	0,5
14	21,6	0,5
15	26,5	0,5
16	32,6	0,5
17	40	0,5

Tabla 19. Progresión de aberturas utilizadas en los S.E.V.

Las mediciones se hicieron con un Terrameter SAS-1000 de la casa ABEM. Fueron efectuados un total de 14 puntos de S.E.V, distribuidos en 3 perfiles perpendiculares a la línea de costa (Fig 29), en cotas desde los 2 m.s.n.m. hasta los 9 m.s.n.m. distribuidos de la siguiente forma:

Perfil Salidero - Ubicado al sur del área de los trabajos, incluye 3 S.E.V que en orden de E (costa) – W (interior) se denominaron Salider1, Salider2 y Salider3. Estos puntos de SEV se ubicaron en las cercanías de sondeos mecánicos.

Perfil vivero – fonteta – Ubicado al centro entre los otros perfiles Se efectuaron 5 sondeos designados como: vivero, fonviv1, fonviv2, fonviv3 y fonteta, dos de estos puntos de S.E.V coincidían con sondeos mecánicos.

Perfil Factoría – Se ubica en la parte norte del área de la investigación. Incluye un total de 6 S.E.V designados, de nuevo desde la costa hacia el interior con los siguientes nombres: Factoría1, Factoría2, factoría3, Factoría4, Factoría5 y Factoría6. En este caso no disponiéndose de sondeos mecánicos en esta zona.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

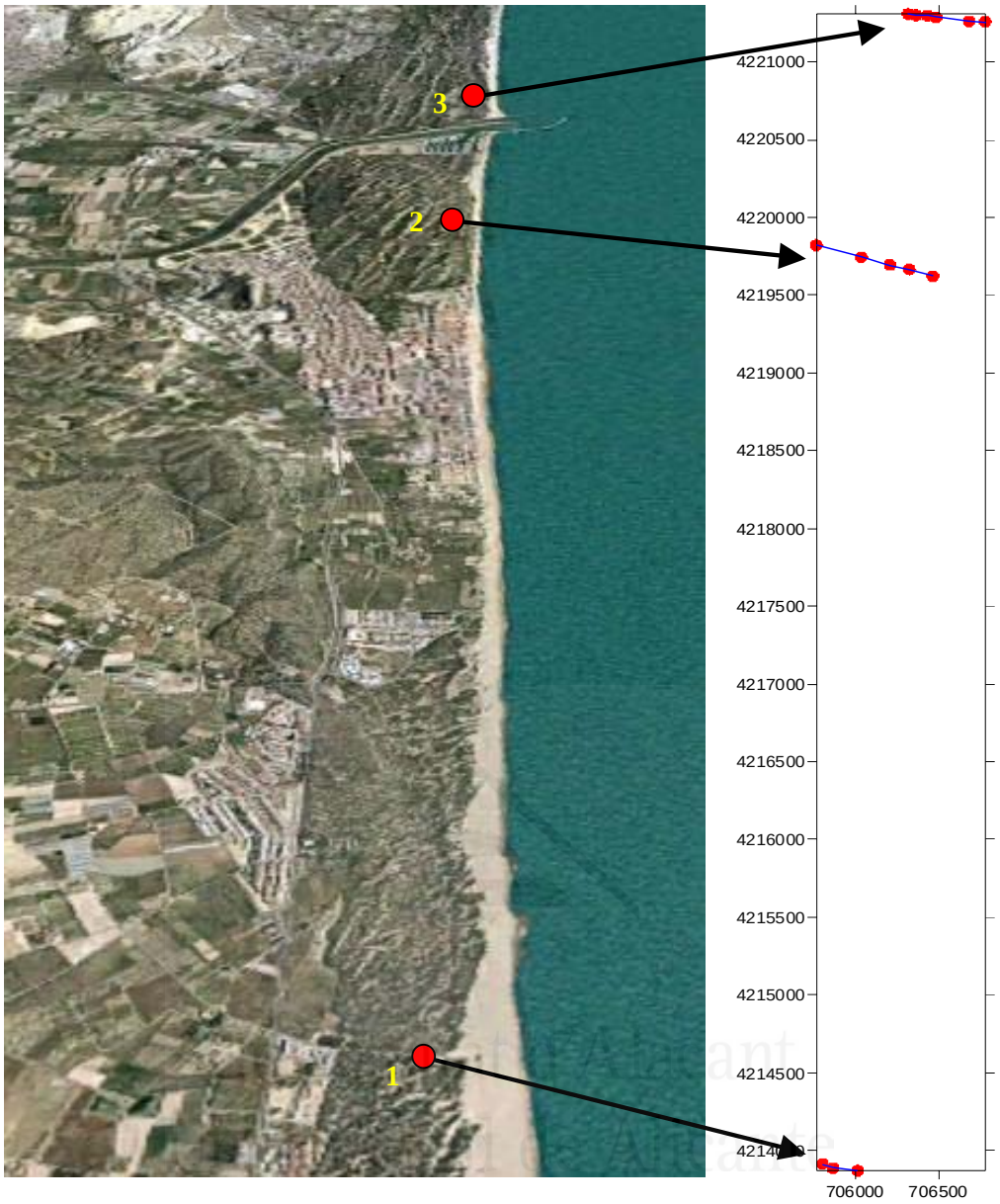


Figura 29. Ubicación de los perfiles de S.E.V, donde el perfil 1 corresponde a Salidero, el 2 vivero-fonteta y el número 3 factoría.

Durante la adquisición de los datos, se procedió al cálculo de los valores de la resistividad aparente para cada una de las dimensiones del dispositivo de observación empleado, así como el graficado de la curva de sondeo eléctrico vertical, con el objetivo de controlar la calidad de la misma.

La interpretación cuantitativa de los S.E.V se realizó con el programa IPI2win de la Academia de las Ciencias de Moscú (Shevnin y Modin, 2003), con el cual se ajustó semi-automáticamente, imponiendo en todo caso valores resistivos dentro de los rangos

de resistividad conocidos para cada litología y se condicionó a que el error de ajuste fuera menor a 5%.

La interpretación cuantitativa de curvas de S.E.V presentes en cada perfil obtenida en el campo se hizo con el programa IPI2WIN, dando como resultado en cada caso las resistividades, espesores y profundidad del piso de las capas presentes en cada punto de S.E.V.

6.3.3 Evolución y características químicas del agua del subsuelo.

Se hizo un seguimiento del nivel freático durante más de dos años a cada uno de los pozos. Las mediciones tanto de nivel como de análisis químico se programaron de la siguiente manera: cada quince días durante 14 meses, luego cada mes y por último después de cada evento de lluvia. Para tomar las variaciones de nivel freático se uso una cinta métrica de señal electro acústica con una longitud de 30 metros. Luego se hicieron mediciones de parámetros físico-químicos *in situ* utilizando un termosalinómetro ORION 135 (figura 30) con el cual podíamos medir conductividad, salinidad y temperatura, para pH se utilizo el modelo PHM-82 Radiometer.

Figura 30. Termosalinómetro ORION 135 utilizado en el monitoreo de los pozos.

Las muestras de agua obtenidas en cada muestreo se almacenaban en botellas de polietileno con doble tapón con capacidad de 500ml, sin burbujas de aire y resguardándolas de la luz, una vez llegaban estas muestras el laboratorio se procedía a

filtrarlas con un filtro de membrana 0,45 µm de la casa millipore. Posteriormente se procedía a medir el pH y por último se hacia el análisis químico. La metodología utilizada para realizar esta analítica esta descrita en el capítulo 3.

6.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE RESISTIVIDAD.

6.4.1 Potencial originado por una fuente puntual en la superficie de un semiespacio homogéneo.

Sea una fuente puntual de corriente (polo galvánico), como la que se muestra en la figura 31, colocada en la superficie de separación aire-tierra consideremos el semiespacio inferior (terreno) homogéneo de extensión infinita y caracterizada por una resistividad ρ.

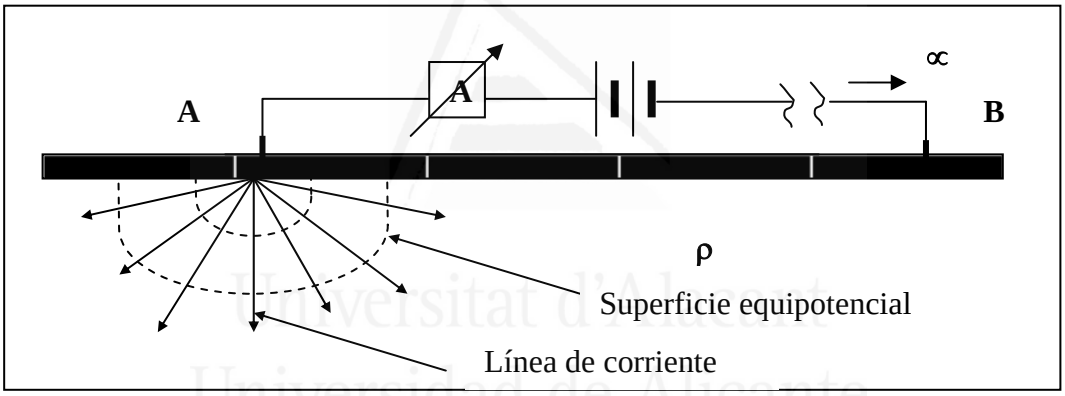


Figura 31. Fuente puntual de corriente en un medio homogéneo e isótropo.

Si analizamos el modelo que sirve como punto de partida, las líneas de corriente que parten del punto de toma a tierra, serán radiales, ya que el medio es homogéneo respecto a su conductividad (ρ = cte.), y las superficies equipotenciales (u=cte.), son semiesferas cuyo centro es el punto A.

En cada una de estas superficies equipotenciales (y teniendo en cuenta la simetría esférica del problema), se cumple que la densidad de corriente es constante ($|J|$ = cte.) y dirigida en la misma dirección radial de las líneas de corriente.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Tenemos una superficie equipotencial cualquiera y designemos por ds un diferencial de superficie de la misma, la que estaría representada vectorialmente por la normal a dicha superficie (figura 32).

Aplicando la ecuación de continuidad:

$$i = \oint J.ds$$

Resolviendo el producto escalar de los vectores J y ds:

$$i = \int |J|.|ds|.\cos\theta$$

Donde θ es el ángulo entre dichos vectores que en nuestro caso es θ= 0^0, ya que son colineales.

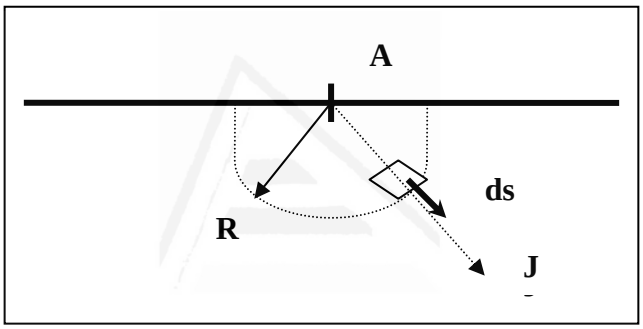


Figura 32. Demostración gráfica de que ds y J son colineales

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

$$i = |J|\oint.|ds|.\cos 0^0 = |J|\oint.|ds|$$

pero, $\oint.|ds| = \frac{\Pi.R^2}{2}$

Este último resultado parte de considerar solamente el semiespacio o sea el área correspondiente a la semiesfera. Ello tendría una implicación importante, ya que al disminuir el volumen a la mitad y ser i = cte., la densidad de corriente se duplicará ya que sólo circula por el semiespacio inferior y;

$$|J'| = 2.|J|$$

y entonces,

$$i = 2.\left|J'\right|.\Pi.R^2 \quad \Rightarrow \quad \left|J\right| = \frac{i}{2.\Pi.R^2}$$

Considerando la Ley de Ohm:

$\left|J'\right| = \sigma.\left|E\right| = \frac{\left|E\right|}{\rho}$ despejando |E| y sustituyendo la expresión de |J´| $\left|E\right| = \frac{i.\rho}{2.\Pi.R^2}$

O sea la intensidad del campo eléctrico producido por un electrodo puntual en un medio homogéneo, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a dicha fuente y es directamente proporcional a la resistividad del medio, así como a la intensidad de la corriente entregada por la fuente puntual de corriente.

Vamos entonces a determinar la expresión que nos permita calcular la diferencia de potenciales entre dos puntos de ese medio, partiendo de la solución de la siguiente integral de línea;

$$\Delta U_{MN} = -\int_N^M \left|E\right|.\left|dl\right|$$

Donde el recorrido o trayectoria no influirá en el resultado de la integral, ya que el campo eléctrico, es conservativo, por lo que sólo interesa el punto inicial y final (ver figura 33).

$$\Delta U_{MN} = -\int_{r2}^{r1} \frac{I.\rho}{2.\Pi.R^2}.dR = -\frac{I.\rho}{2.\Pi}\int_{r2}^{r1}\frac{dR}{R^2} = \left[-\frac{I.\rho}{2.\Pi}.\frac{1}{R}\right]_{r2}^{r1}$$

$$\Delta U_{MN} = -\frac{I.\rho}{2.\Pi}.\left[\frac{1}{r2} - \frac{1}{r1}\right] = \frac{I.\rho}{2.\Pi}.\left[\frac{1}{r1} - \frac{1}{r2}\right]$$

La última expresión es válida si los puntos en que queremos medir el potencial están situados en la superficie del semiespacio (terreno), como se aprecia en la figura 34.

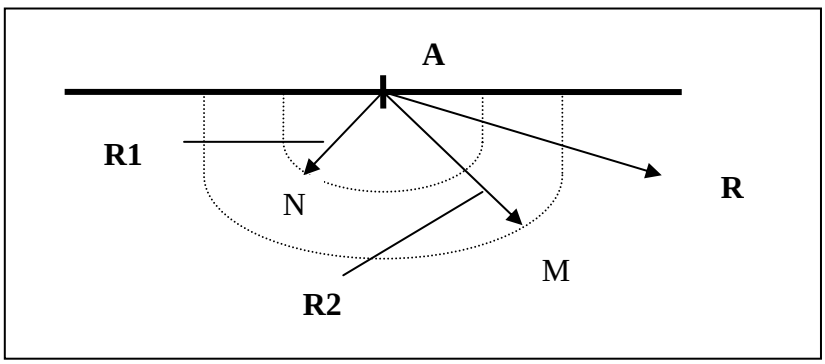


Figura 33. Diferencia de potenciales entre dos superficies equipotenciales.

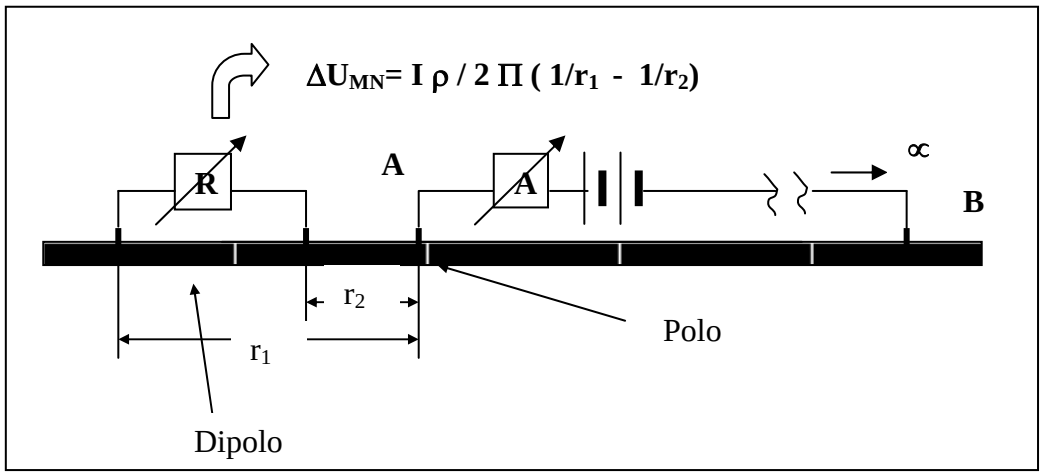


Figura 34. Caso del dispositivo polo - dipolo.

Por otra parte, el cálculo del valor del potencial en un punto en la superficie del terreno, se obtendría suponiendo que una de las tomas a tierra del dipolo receptor, se ubique a una distancia suficientemente lejana, tal que se pueda considerar infinita ($r_2 \to \infty$),como se muestra en la Figura 35 en tal caso como el potencial eléctrico es una magnitud escalar aditiva, si son varias las fuentes de corriente, el potencial en un punto cualquiera en la superficie del terreno, vendría dado por la suma algebraica de los potenciales debidos a cada fuente. De modo que en el caso general, la expresión quedaría:

$$U_p = \frac{\rho}{2.\Pi} \sum_{k=1}^{n} \frac{I_k}{r_k}$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

donde:

k=subíndice de la fuente

n=número de fuentes de corriente.

I_k=magnitud de la corriente (+/- en la pendiente de su polaridad).

r_k=distancia de la fuente al punto P.

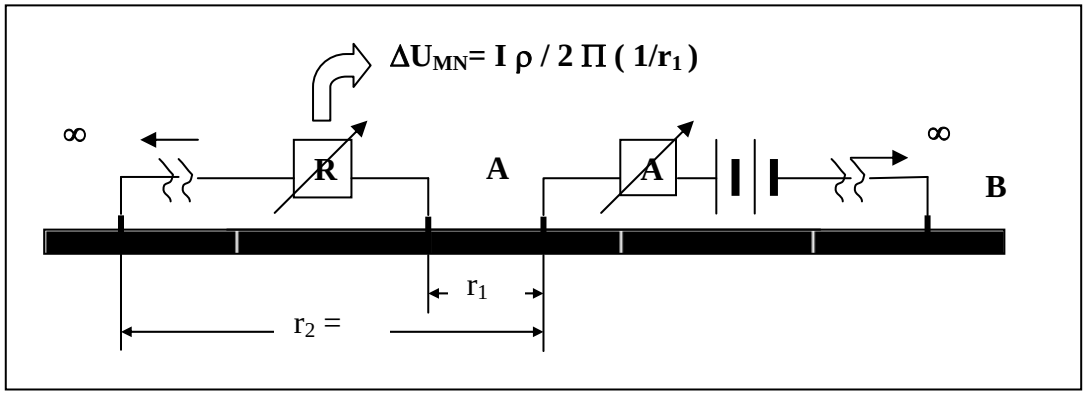


Figura 35. Caso del dispositivo polo - polo.

6.4.2 Expresión de la resistividad para un dispositivo de cuatro electrodos.

Consideremos el dispositivo que aparece en la figura 36 compuesto por un emisor (AB) y receptor (MN) galvánicos, cuyos puntos de tomas a tierra se ubican sobre la superficie de un medio homogéneo. Por el emisor se emite una corriente de intensidad I por ambos electrodos, pero de polaridad opuesta.

Partiendo de la expresión general deducida en el apartado anterior, es posible obtener el potencial en los puntos M y N:

$$U_M = \frac{\rho I_A}{2\Pi AM} - \frac{\rho I_B}{2\Pi BM} = \frac{\rho}{2\Pi}\left[\frac{I_A}{AM} - \frac{I_B}{BM}\right]$$

$$U_N = \frac{\rho I_A}{2\Pi AN} - \frac{\rho I_B}{2\Pi BN} = \frac{\rho}{2\Pi}\left[\frac{I_A}{AN} + \frac{I_B}{BN}\right]$$

Teniendo en cuenta que $|I_A| = |I_B| = I_{AB}$

$$U_M = \frac{\rho I_{AB}}{2\Pi}\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right] \qquad U_M = \frac{\rho I_{AB}}{2\Pi}\left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right]$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

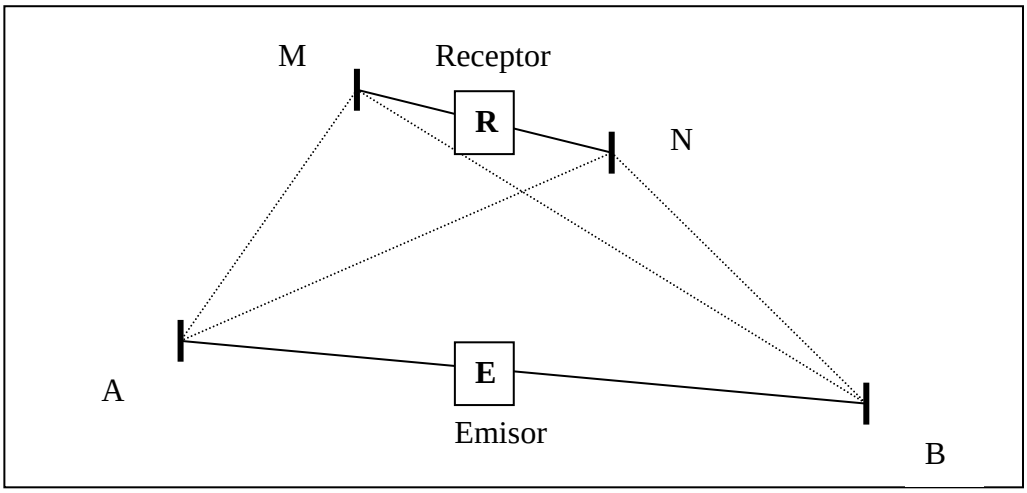


Figura 36. Geometría del problema para un dispositivo de 4 electrodos.

Pero en este caso lo que se medirá en el galvanómetro del dispositivo receptor es la diferencia de potenciales $\Delta U_{MN} = U_M - U_N$

$$\Lambda U_{MN} = \frac{\rho I_{AB}}{2\Pi}\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right] - \frac{\rho I_{AB}}{2\Pi}\left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right]$$

Si ahora despejamos la Resistividad, se obtiene:

$$\rho = \frac{2.\Pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right]} \cdot \frac{I_{AB}}{\Lambda U_{MN}}$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La última expresión, constituye el fundamento físico del método de resistividad, por lo que veamos algunas consideraciones sobre la misma:

a) Colocando en la superficie del terreno un dispositivo emisor-receptor galvánico, del tipo mostrado y conocidos:

   - ❖ Distancia entre los electrodos del circuito emisor y receptor, esto es AM, AN, BM y BN.

   - ❖ Intensidad de la corriente que se hace pasar al terreno (I_{AB})

- El valor de la diferencia de potenciales entre electrodos del receptor (ΔU_{MN}).

Se puede determinar el valor de la resistividad del terreno.

b) La expresión, se expresa comúnmente de forma simplificada.

$$\rho = K.\frac{I_{AB}}{\Lambda U_{MN}}$$

donde K se denomina constante del dispositivo y depende de la geometría del mismo.

c) El valor de la resistividad obtenido por la expresión anterior, en el caso de un medio homogéneo, coincidirá con el valor de la resistividad verdadera del mismo.

d) En la práctica, no existen medios homogéneos. Por lo tanto en las observaciones realizadas lo que se obtiene es un valor convencional con dimensiones de resistividad, afectado por todas las heterogeneidades existentes en el subsuelo que influyen en la distribución de los potenciales en un determinado volumen. A esta magnitud se le denomina Resistividad Aparente (ρ_a). Es necesario aclarar que bajo ninguna condición la ρ_a coincide con la resistividad promedio de las rocas del subsuelo. Para su cálculo se expresa la misma expresión.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

$$\rho_a = K.\frac{I_{AB}}{\Lambda U_{MN}}$$

e) Como se aprecia de la expresión de la resistividad aparente, si las distancias entre los electrodos se mantienen fijas, ello implicará que K = cte. Por otra parte, el valor de I_{AB}, puede ser controlado, entonces el valor calculado de ρ_a, dependerá casi exclusivamente de las variaciones del ΔU_{MN}, que a su vez dependerá de las heterogeneidades y propiedades del medio por donde circulen las corrientes, esto es:

$$\rho_a \propto \Delta U_{MN} \propto J$$

O sea, un incremento de la densidad de corriente en los alrededores del receptor, implicará un incremento proporcional de la diferencia de potenciales ΔU_{MN} y eso se reflejará en un alto valor de la ρ_a calculada. Por el contrario, una baja densidad de corriente en los alrededores de M y N, implicará un bajo valor de la ρ_a calculada.

6.4.3 El concepto de anomalía en el método de ρ_a.

No obstante los inconvenientes que se presentan en el estudio del subsuelo, que se deben a la alta heterogeneidad que comúnmente se presenta en la distribución de resistividades en el mismo, condicionada por la gran diversidad de factores que influyen en la resistividad de las rocas, veamos tres ejemplos sencillos que nos permitirán ilustrar la influencia de heterogeneidades en los valores de ρ_a obtenidos (figura 37)

Como se puede observar el caso (a), en que el valor $\rho_a = \rho_0$ (donde ρ_0 es la resistividad eléctrica del medio), lo vamos a considerar como la condición de campo normal o no anomalía.

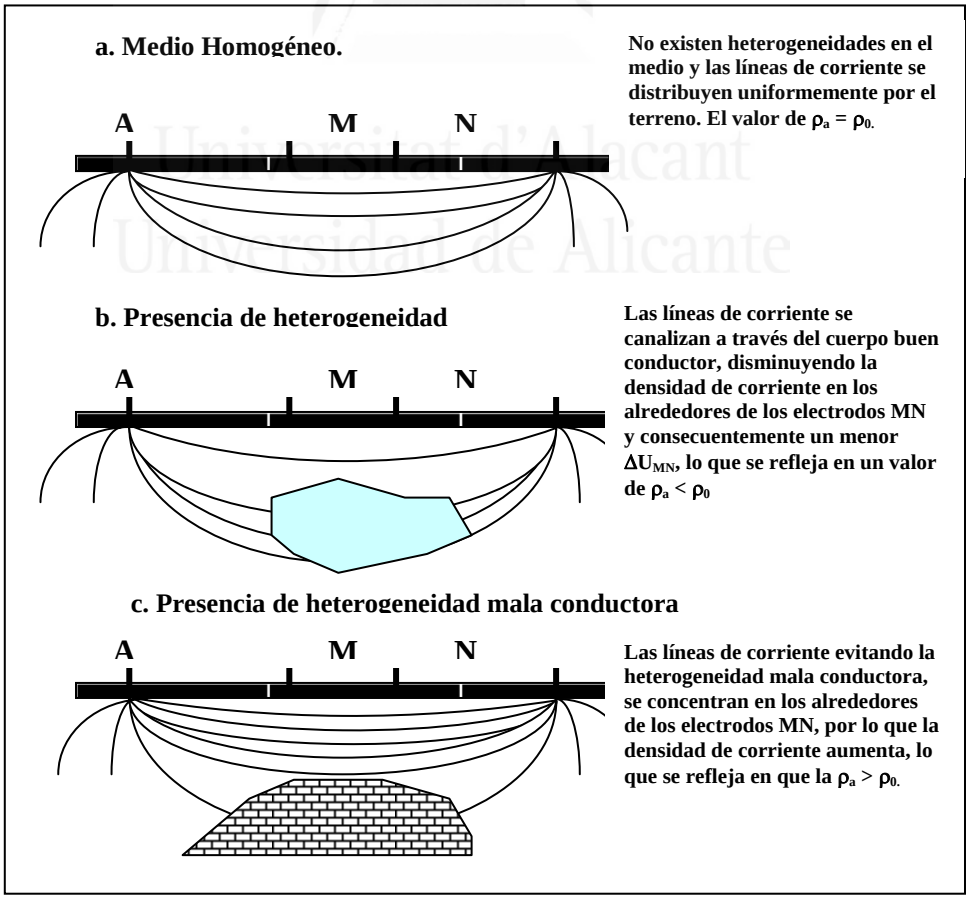


Figura 37. Modelos para explicar concepto de anomalía en método de resistividad.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Por su parte en los ejemplos (b) y (c), la presencia de heterogeneidades cuya resistividad contrasta significativamente con la de las rocas del medio, se reflejará en los valores de ρ_a calculados $\neq \rho_0$ y en este caso podemos referirnos a la presencia de valores anómalos de la resistividad aparente, y es precisamente en este principio físico-geológico, que se fundamenta el método de resistividad.

6.4.4 Variantes de calicatas eléctricas o electroperfilaje de resistividad aparente.

Existe una gran cantidad de variantes en cuanto a los dispositivos empleados dentro de las denominadas calicatas eléctricas de resistividad aparente, veamos sus características comunes más generales:

- En todos los casos son variantes activas que emplean fuentes que generan corrientes continuas o alternas (generalmente de pulsos cuadrados) de muy baja frecuencia.

- Se utilizan como emisor-receptor dispositivos compuestos por dipolos eléctricos, los cuales en casi todas las variantes son de fuente y receptor móviles (se desplazan a lo largo de perfiles o itinerarios).

- La magnitud que se mide es la distribución espacial de las diferencias de potenciales entre los electrodos del receptor lo que como se pudo comprobar, permite calcular la ρ_a del subsuelo en un determinado volumen de rocas en los alrededores de la ubicación del dispositivo.

- Entonces la distribución de estos valores de la ρ_a estarán asociados a las heterogeneidades del subsuelo, en especial aquellos asociados a cuerpos o estructuras geológicas de yacencia vertical.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.4.5 Tipos de dispositivos empleados.

Se clasifican en base al número de electrodos y a la ubicación del receptor con respecto al emisor (Zona de exploración).

6.4.5.1 Dispositivos lineales con Zona de Exploración Central.

En este Grupo (ver Figura 38), se emplean los llamados dispositivos de 4 electrodos, ubicándose la línea del dispositivo receptor colineal a la línea del dispositivo emisor y entre los electrodos A y B, de aquí su nombre de "zona de exploración central".

6.4.5.2 Dispositivos lineales con Zona de Exploración Lateral.

En este caso los vamos a clasificar a su vez en dispositivos del tipo Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo.

6.4.5.2.1 Polo-Dipolo. Son aquellos en los cuales uno de los polos del emisor se ubica a una distancia suficientemente lejana que se pueda considerar en el infinito (figura 39), por lo que el potencial producido en los electrodos receptores por la corriente vinculada al mismo se puede considerar despreciable. Son dispositivos que comúnmente también se clasifican como de 3 electrodos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.4.5.2.2 Dipolo-Dipolo. El dispositivo emisor y receptor representados por dipolos (figura 40). En este caso la distancia entre los electrodos de los dispositivos Emisor y Receptor es pequeña con relación a la separación entre los electrodos contiguos del E y el R.

6.4.5.3 Gradiente de potencial. También conocido como "instalación de cero", consiste en colocar un tercer electrodo de potencial entre M y N, electrodo O (figura 41a). En un medio idealmente homogéneo se cumplirá que $\Delta U_{MON} = \Delta U_{MO} + \Delta U_{ON} = 0$, ya que $\Delta U_{MO} = |-\Delta U_{ON}$. En cada punto de observación se obtendrán las resistividades ρ_a(AMOB) y ρ_a(AONB).

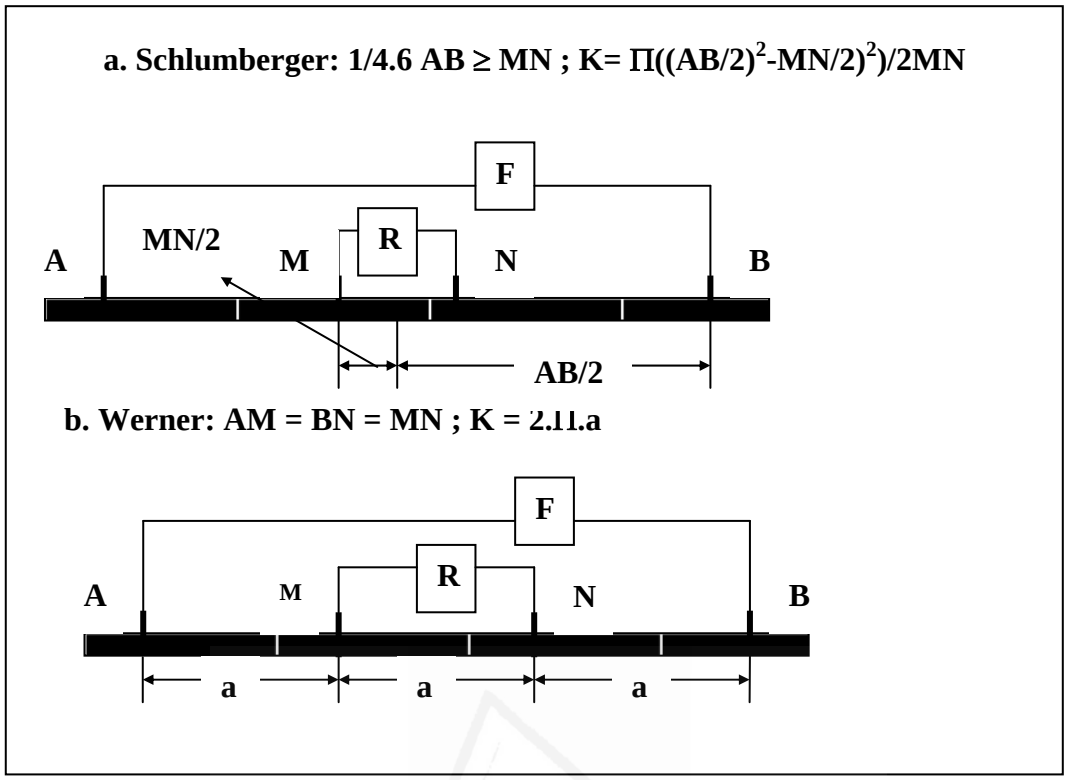


Figura 38. Esquemas de dispositivos de zona de exploración central.

6.4.5.4 Dispositivos divergentes. En este caso se colocan dos resistencias variables R_1 y R_2 de valores diferentes (Figura 41b). Se realizan tres observaciones. ρ_a(AMNB), ρ_a(AMR_1OR_2NB) y ρ_a(AMR_2OR_1NB).Las dos últimas magnitudes de ρ_a, son proporcionales a la segunda derivada del potencial eléctrico por lo que teóricamente deben obtenerse anomalías de ρ_a superiores en amplitud, a las obtenidas en los dispositivos tradicionales.

6.4.5.5 Dispositivos de dos componentes. Se coloca otro dipolo receptor perpendicular a la línea del emisor (figura 41c). En un medio idealmente homogéneo $\Delta U_{MN}=0$. Este dispositivo presenta elevada efectividad para el estudio de contactos y estructuras alargadas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

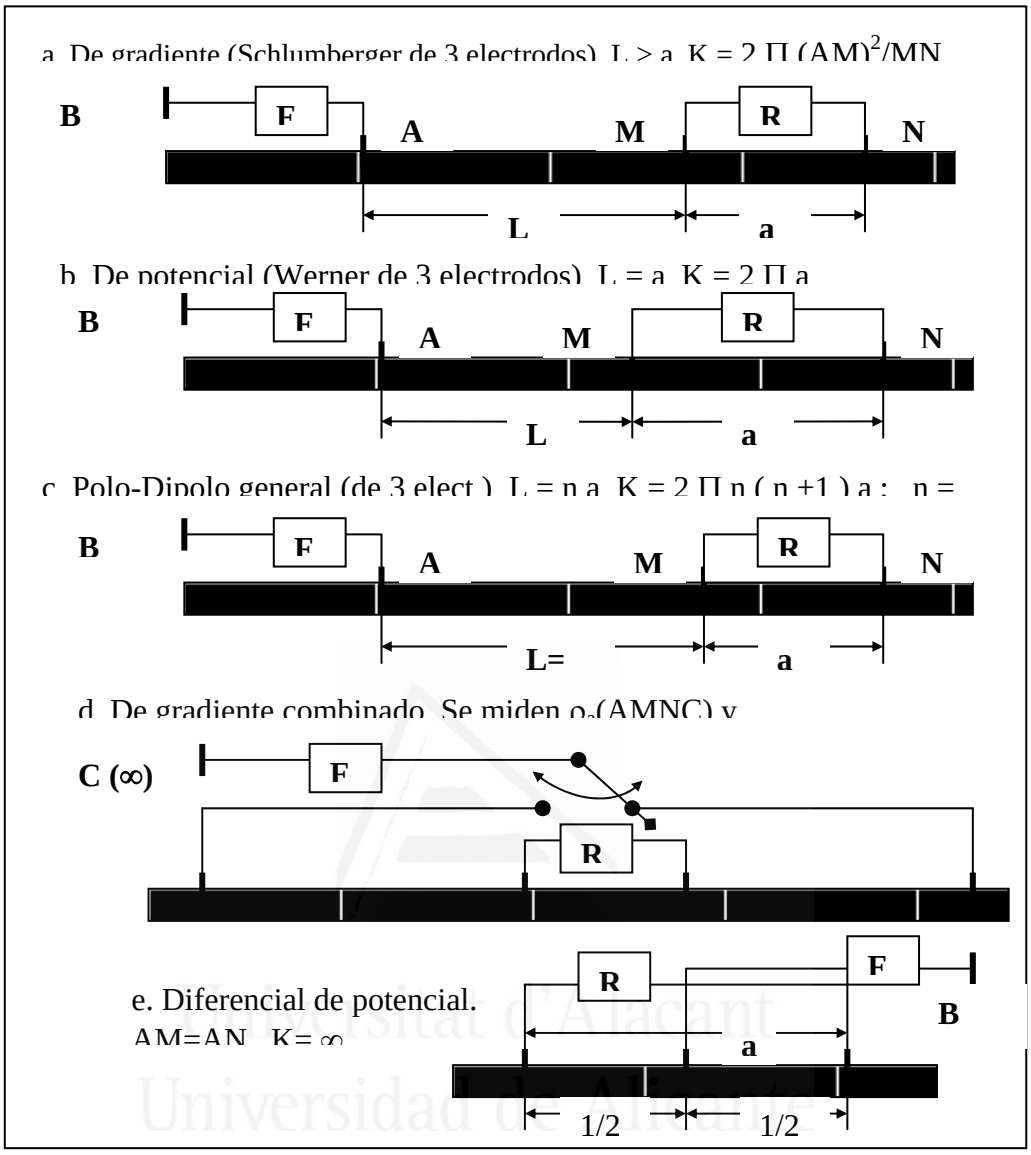
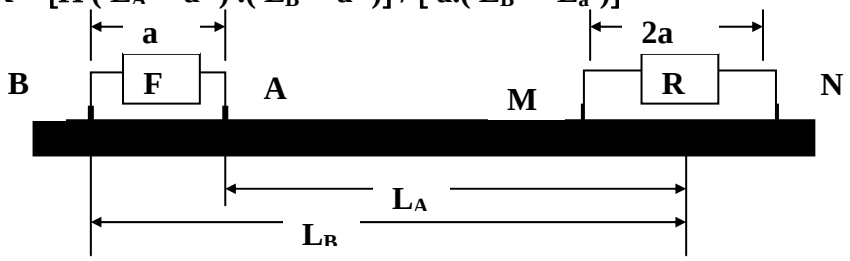


Figura 39 Esquemas dispositivos polo-dipolo.

6.4.5.6 Dispositivos de corrientes enfocadas. R_1 y R_2 son resistencias variables para garantizar que por los electrodos de corriente A_i, circule la misma magnitud de corriente. Si el medio es homogéneo $\Delta U_{MN}=0$. La K = ∞, por lo que en este caso el parámetro medido es ΔU/I. Se emplean para estudios del Carso y del agrietamiento

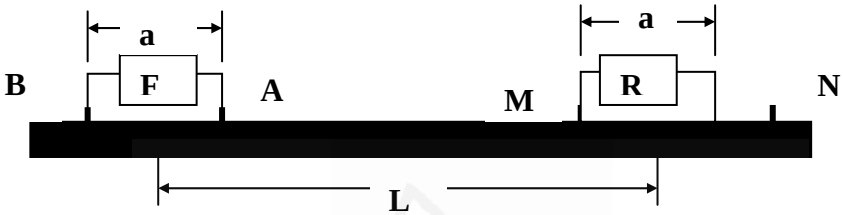
a. Dipolar axial. Caso general. AB≠MN≠AM

$$K = [\Pi (L_A^2 - a^2) .(L_B^2 - a^2)] / [a.(L_B^2 - L_a^2)]$$



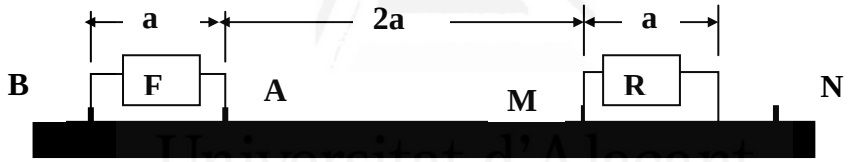
b. Dipolar axial AB = MN ≠ AM

$$K = [\Pi.L (L^2 - 4.a^2)] / [4.a.^2]$$



c. Dipolar axial. AB = MN = a; AM = n.a (n = 1,2,3.....)

$$K = \Pi n (n +1) (n + 2) a$$



d. Dipolar paralelo. AB ≠ MN

$$K = \Pi / [1 / \sqrt{((L - a)^2 + b^2)} - 1 / \sqrt{((L + a)^2 + b^2)}]$$

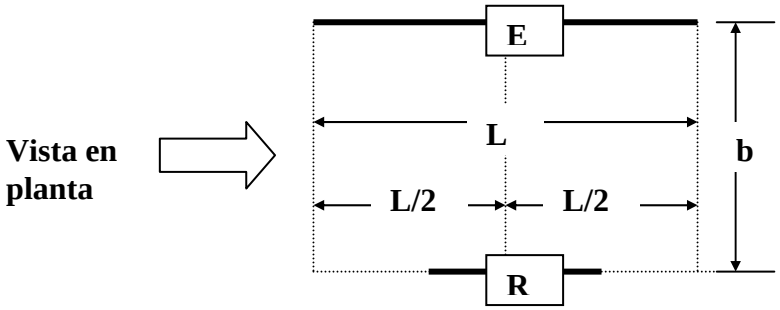


Figura 40. Dispositivos Dipolo-Dipolo.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

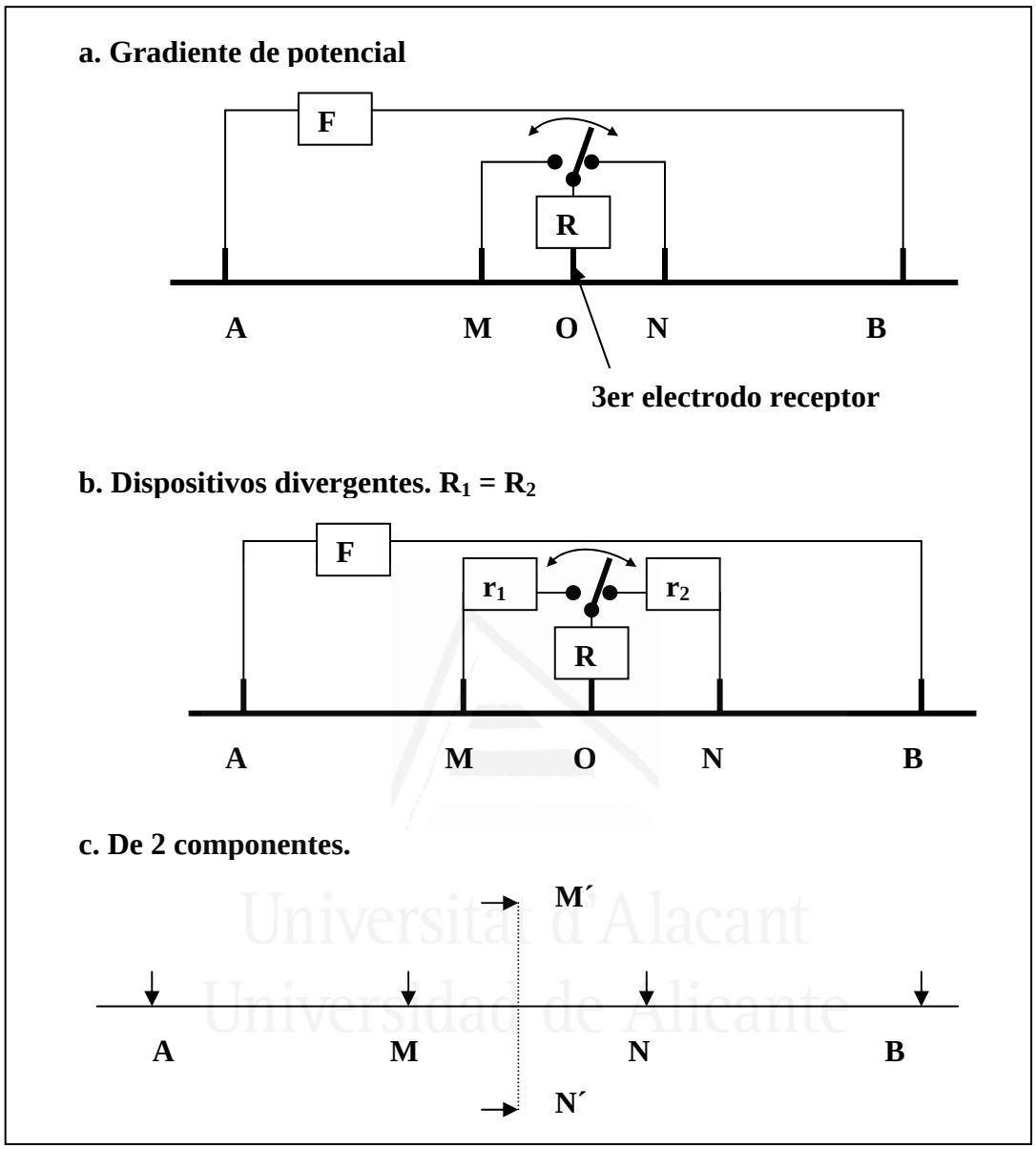


Figura 41. Dispositivos especiales.

6.4.6 Anomalías.

6.4.6.1 Modelos teóricos.

Teniendo en consideración la importancia que tiene para la interpretación de los resultados obtenidos con las variantes incluidas en el perfilaje eléctrico (P.E) de resistividad aparente y lo complicado que generalmente resultan las anomalías, se hace necesario detenernos brevemente y exponer algunos aspectos relacionados con el modelaje teórico de las anomalías.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Los puntos característicos de una anomalía de P.E. de ρ_a (Orellana, 1986), son de forma muy general, las que se muestran en la figura 42:

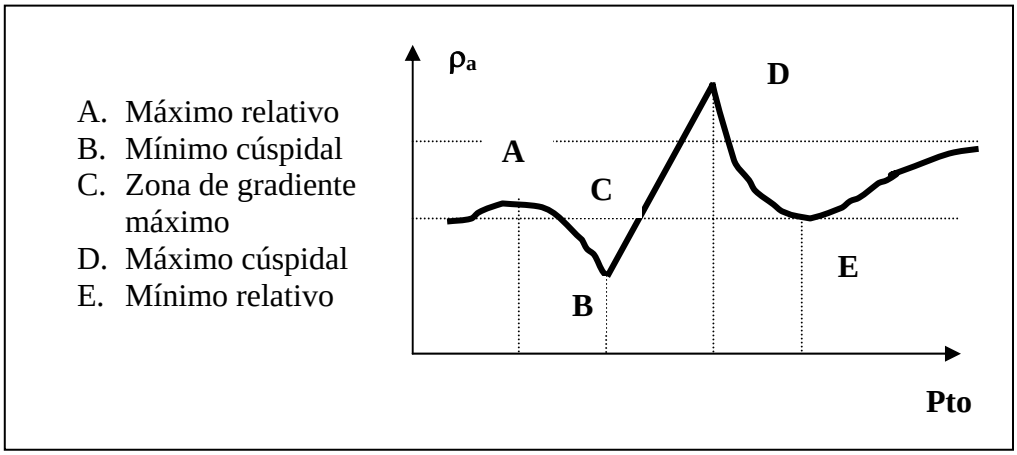


Figura 42. Puntos característicos de una anomalía de P.E. de ρ_a

6.4.6.2 Caso de los contactos.

En la figura 43, se muestra la anomalía teórica de ρ_a, para un dispositivo del tipo polo-dipolo AMNB(∞), que se traslada de forma tal que el perfil es perpendicular al contacto entre dos medios de resistividades ρ_1 y ρ_2, tal que $\rho_2 = 9 \cdot \rho_1$.

Bajo estas condiciones se deben establecer 4 momentos:

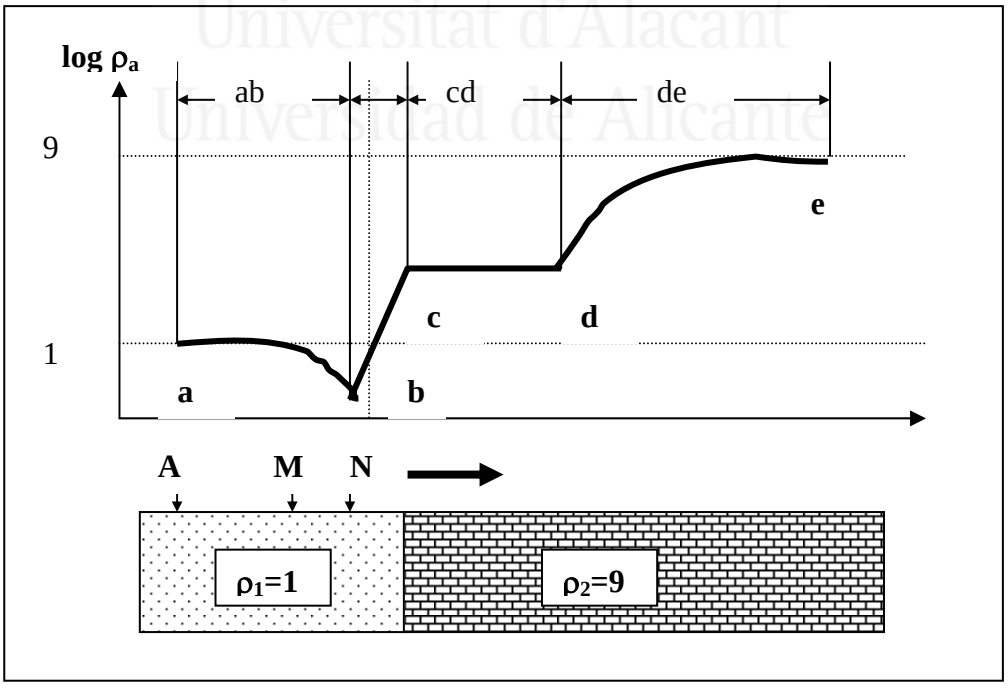


Figura 43. Modelo del contacto vertical.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

a) Los electrodos del E y el R (AMN), están situados en el medio de resistividad ρ_1. En la medida que el electrodo N se acerca al contacto, los valores de ρ_a disminuyen hasta el mínimo cuspidal (b) y cuando N llega al contacto (tramo ab).

b) El electrodo A y M están en el medio ρ_1 y el electrodo N se encuentra en el medio ρ_2. Durante este movimiento del dispositivo se produce la máxima variación de la ρ_a, con un fuerte gradiente desde el punto b al c, siendo así hasta que el electrodo M llega al contacto.

c) Los electrodos MN se encuentran en el medio ρ_2 y el emisor A se encuentra en el medio ρ_1. El valor de la ρ_a en este tramo (c-d), se mantiene constante hasta que el electrodo A llega al contacto.

d) Los 3 electrodos AMN se encuentran en el medio ρ_2 y en la medida que se alejan del contacto el valor de la ρ_a, tiende asintóticamente al valor de ρ_2, tramo (d-e) de la curva.

Ahora bien existen toda una serie de factores que afectan las características de estas anomalías, enmascarando su comportamiento y dificultando significativamente su interpretación.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En la figura 44, se muestra el comportamiento de las curvas teóricas de ρ_a, para diferentes ángulos de buzamiento del contacto.

Como se puede apreciar, en la medida que el ángulo de buzamiento disminuye, la curva se hace más suave, los máximos y mínimos cuspidales tienden a desaparecer y se hace difícil la detección del contacto con precisión.

En la figura 45 se muestran las curvas teóricas sobre un contacto vertical, para dispositivos dipolares axiales (dipolo-dipolo), teniendo en cuenta diferentes espesores de una cobertura de alta resistividad sobre el contacto. Con el incremento del espesor de la cobertura con relación a las dimensiones del dispositivo la curva se va suavizando y

prácticamente se hace imposible detectar el contacto para espesores superiores a 1/2 L, ello se condiciona a que en estos casos.

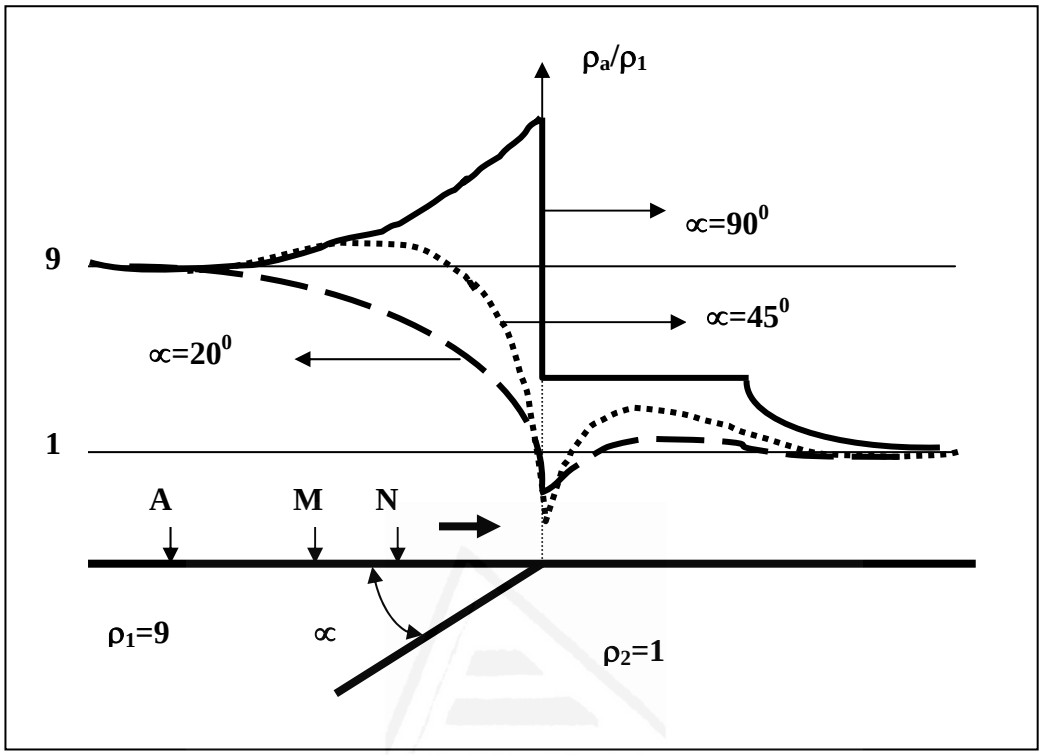


Figura 44. Influencia del buzamiento del contacto en las anomalías.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

De lo planteado anteriormente salta a la vista la necesidad de una selección cuidadosa de las dimensiones del dispositivo si se desea tener algún éxito en la campaña.

La gran mayoría de la corriente circulará por la cobertura y los valores de potenciales medidos estarán influenciados básicamente por la resistividad de la misma. Para el caso de un dispositivo de 4 electrodos de zona de exploración central (Schlumberger) para H > 1/4 AB/2, prácticamente resulta imposible detectar el contacto.

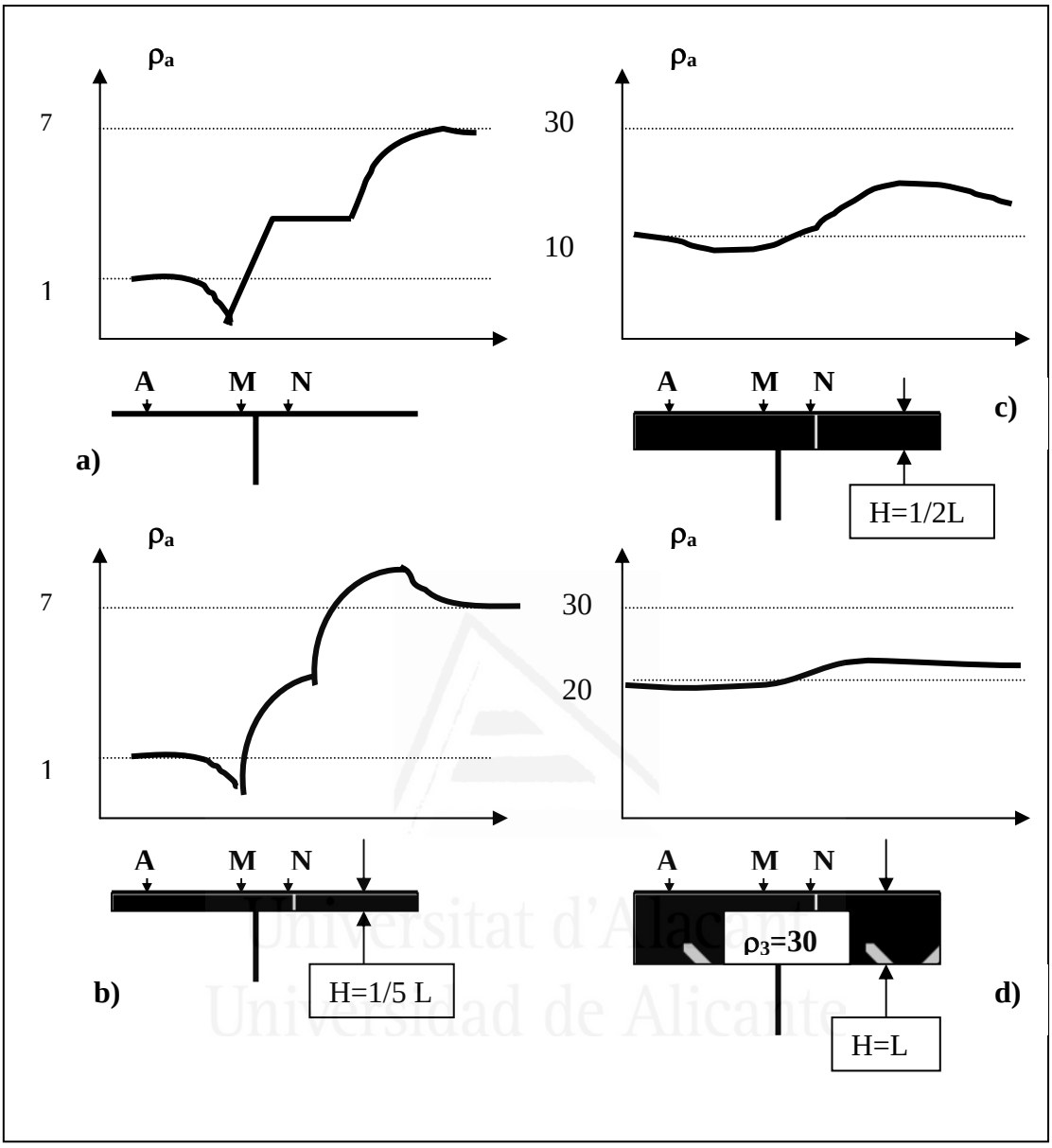


Figura 45. Influencia de coberturas resistivas en las anomalías.

Otro aspecto que influye en las anomalías es la abertura del dispositivo receptor (MN). Como se observa en la figura 46. Con el aumento de la distancia MN, se alejan proporcionalmente el máximo y el mínimo cúspidal y se suaviza la zona de discontinuidad vertical en la ρ_a.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

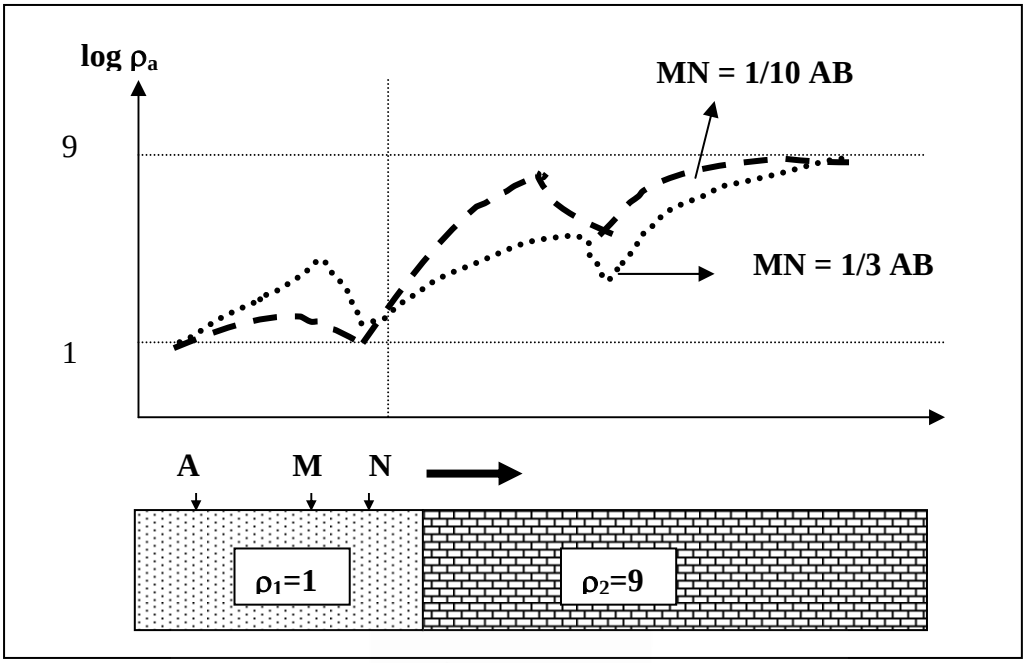


Figura 46. Influencia de la abertura MN en las anomalías.

6.4.6.3 Caso de cuerpos estratiformes.

Para simplificar el modelo, vamos a considerar solamente cuando la capa es vertical y perpendicular al perfil de investigación. Se deben destacar dos situaciones extremas:

6.4.6.3.1 Capas potentes o gruesas. Cuando el espesor de la capa (b) es mayor que las dimensiones del dispositivo (L) - por supuesto, L dependerá de la variante empleada.

6.4.6.3.2 Capas finas. Corresponde al caso contrario en el cual el espesor de la capa o estrato es menor o igual que las dimensiones del dispositivo empleado ($L \geq b$).

En la figura 47, se observan las anomalías de ρ_a para un dispositivo de zona de exploración central de tipo Schlumberger, sobre una capa de alta resistividad de gran potencia (gruesa) - (a) y para una capa fina también de alta resistividad respecto al medio circundante - (b).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

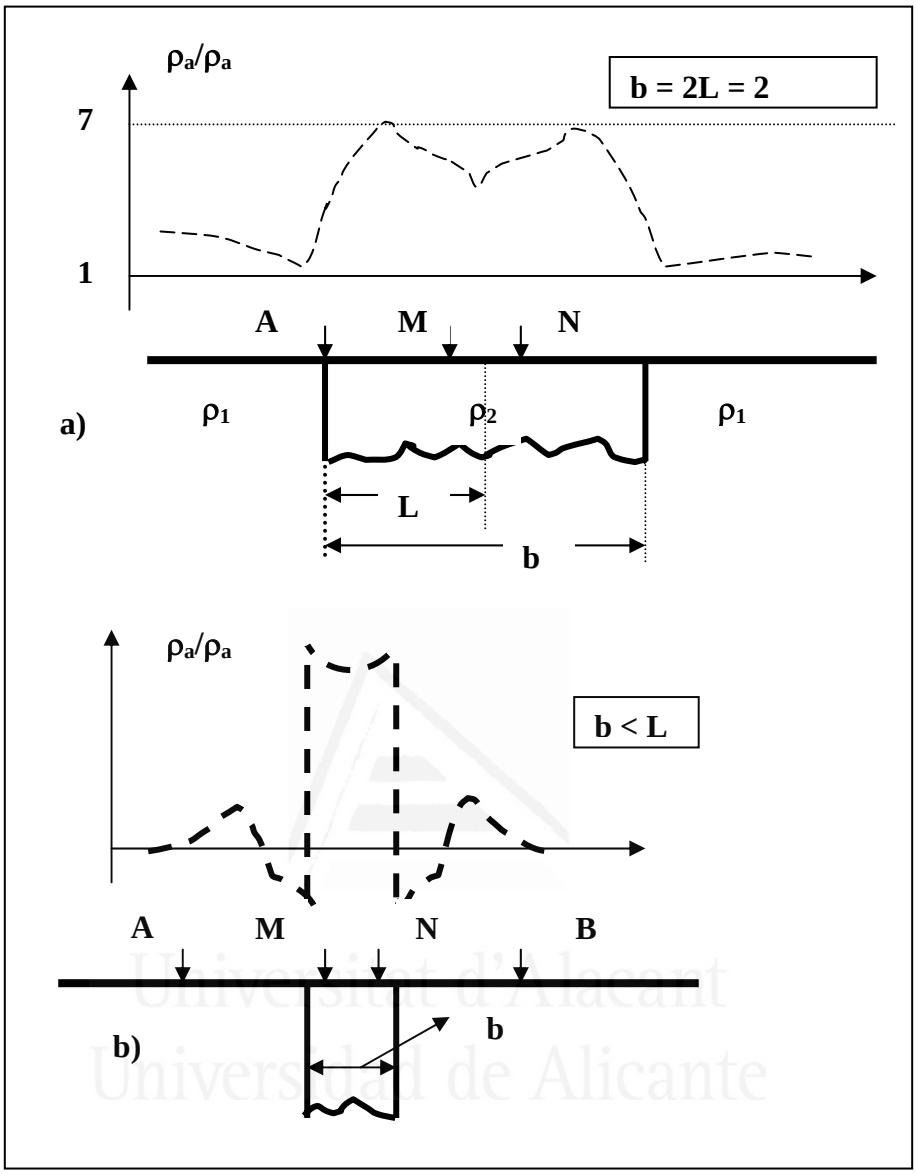


Figura 47. Modelos de las capas o estratos verticales.

Queremos señalar que en la literatura geofísica se encuentra ampliamente tratado el aspecto concerniente a los modelos físico geológico y las anomalías asociadas, así como para toda una serie de dispositivos empleados.

6.4.6.4 Factores que desfiguran las anomalías de Perfilaje Eléctrico de ρ_a.

Existen toda una serie de factores perturbadores, que originan ruidos en las anomalías de ρ_a, lo que tiene gran importancia a la hora de la interpretación de los datos. En la tabla 20 que se muestra a continuación, aparece una clasificación de los mismos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Factor	Características
De carácter Geológico. Factores vinculados a la yacencia y geometría de los cuerpos o estructuras, y su relación de resistividades con las rocas de caja.	Existencia de coberturas sobre los objetos de investigación. Potencia y contrastes de resistividades de las mismas, etc.
	Yacencia y geometría de los objetos de investigación. Profundidad de yacencia, ángulo de buzamiento, contraste de resistividades con el entorno, en el caso de capas la relación entre su espesor y dimensiones del dispositivo, etc.
	Anisotropía del medio.
De carácter no Geológico. Vinculados a factores de naturaleza no geológica.	Circulación de corrientes naturales (Telúricas) o industriales.
	Relieve del terreno
	Angulo que forma el perfil respecto al rumbo de los cuerpos.
	Dimensiones del dispositivo - Tanto de la línea emisora como la receptora.

Tabla 20. Factores que desfiguran las anomalías de P.E. de ρ_a.

En la tabla 21, se muestra como influyen aproximadamente estos factores en las características generales de las anomalías, lo que constituye una guía para la interpretación.

Características / Factores ↓	Forma	Amplitud (A)	Extensión	Gradiente
Forma de los cuerpos	SI	SI	SI	SI
Contraste de ρ $\Delta\rho=(\rho_1-\rho_2)$	NO	SI ↑	NO significativo	SI ↑
Buzamiento del cuerpo	SI	SI ↓	NO	SI ↓
Espesor cobertura	SI	SI ↓	NO	SI ↓
ρ cobertura	NO	SI ↓	NO	SI ↓
Tipo dispositivo empleado	SI	NO significativo	SI	SI
Dimensión total AO=AB/2	SI	NO	SI	SI
Dimensión receptor (MN)	NO	SI ↓	NO	SI ↓
donde: A ..... (amplitud de la anomalía) A = $\rho_{a\,MÁX}$ / $\rho_{a\,MÍN}$ ↑ ..... Directamente proporcional ↓ ..... Inversamente proporcional.				

Tabla 21. Factores y características de las anomalías de P.E. de ρ_a

6.4.6.5 El problema de la elección de las dimensiones del dispositivo y la profundidad de investigación.

Debemos inicialmente destacar, que el aspecto de la profundidad de investigación, constituye una de las principales problemáticas que se debe enfrentar a la hora de la planificación y organización de cualquier campaña en la cual se pretende emplear el perfilaje electromagnético en general y en particular el electroperfilaje de ρ_a, es por ello que hemos decidido detenernos en esta temática, por cuanto tiene una incidencia determinante en el éxito del cumplimiento de las tareas técnicas asignadas.

Para tener una idea aproximada de este problema, partamos de considerar el siguiente modelo. Sea una fuente constituida por dos polos eléctricos, situados a una distancia L, sea el plano S perpendicular a la línea del dispositivo en el punto medio de la distancia AB (ver figura 48). El medio de resistividad ρ es homogéneo y se extiende de forma infinita en la profundidad.

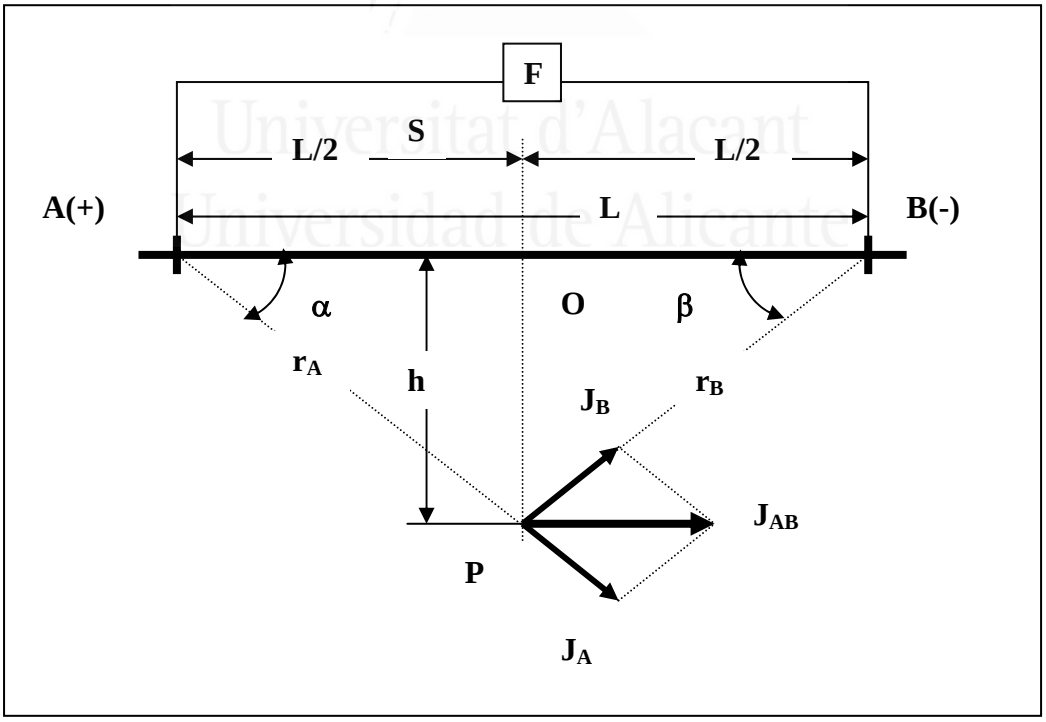


Figura 48. Modelo para la deducción de la dependencia entre L y h.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Bajo estas condiciones, la densidad de corriente en el punto arbitrario P, se podrá calcular por la resultante de las densidades respectivas originadas por los polos A (J_A) y B (J_B), esto es:

$$J_A = \frac{I}{2.\Pi r_A^{\,2}} \qquad J_B = \frac{I}{2.\Pi r_B^{\,2}}$$

$$\left|J_{AB}\right| = \left|J_A\right| + \left|J_B\right| = \frac{I}{2.\Pi r_A^{\,2}}\cos\alpha + \frac{I}{2.\Pi r_B^{\,2}}\cos\beta$$

Pero $r_A = r_B = r$; $\alpha = \beta$; $\cos\alpha = \frac{L/2}{r}$; $sen\alpha = \frac{h}{r}$

$$\left|J_{AB}\right| = \frac{I.\cos\alpha}{\Pi.r^2}$$

Para el punto O, se cumple que r = L/2, y $\alpha = 0^{'0}$, cos α = 1 y se obtiene la expresión de la densidad de corriente en el punto O al nivel de la superficie del terreno:

$$Jo = \frac{4.I}{\Pi.L^2}$$

Sustituyendo r en función de h en la expresión, se obtiene la expresión de J como función de la profundidad (J_h).

$$Jh = \frac{I}{\Pi.h^2}.sen^2\alpha.\cos\alpha$$

Se puede entonces obtener una expresión que nos permite modelar matemáticamente el comportamiento de la densidad de corriente que circula hasta una profundidad h en función de la abertura L del dispositivo:

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

$$\frac{Jh}{Jo} = \frac{\frac{I\cos\alpha}{\Pi.R^2}}{\frac{4.I}{\Pi.L^2}} = \frac{\cos\alpha.L^2}{4.R} = \cos^3\alpha = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^3}{R^3} = \frac{1}{\left(\sqrt{1+\left(2h/L\right)^2}\right)^3}$$

Si la expresión anterior la multiplicamos por 100 y la damos en %, su gráfico se muestra en la figura 49.

Veamos algunas consideraciones respecto a la expresión y el gráfico mostrado en la figura 50:

a) Para una abertura cualquiera AB = L, para una profundidad h = 0,2 L, circulará el 83,3 % de la densidad de corriente en el punto O. Por su parte si h = 0,5 L, circulará solamente el 32 % y si h = L, sólo circulará aproximadamente el 10 %. Ello tiene mucha importancia práctica ya que los valores de potencial que se miden en superficie (su distribución), dependerán de las heterogeneidades que presentan las rocas por las que circulan una parte significativa de esta corriente, no influyendo aquellas rocas que están por debajo de determinada profundidad.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

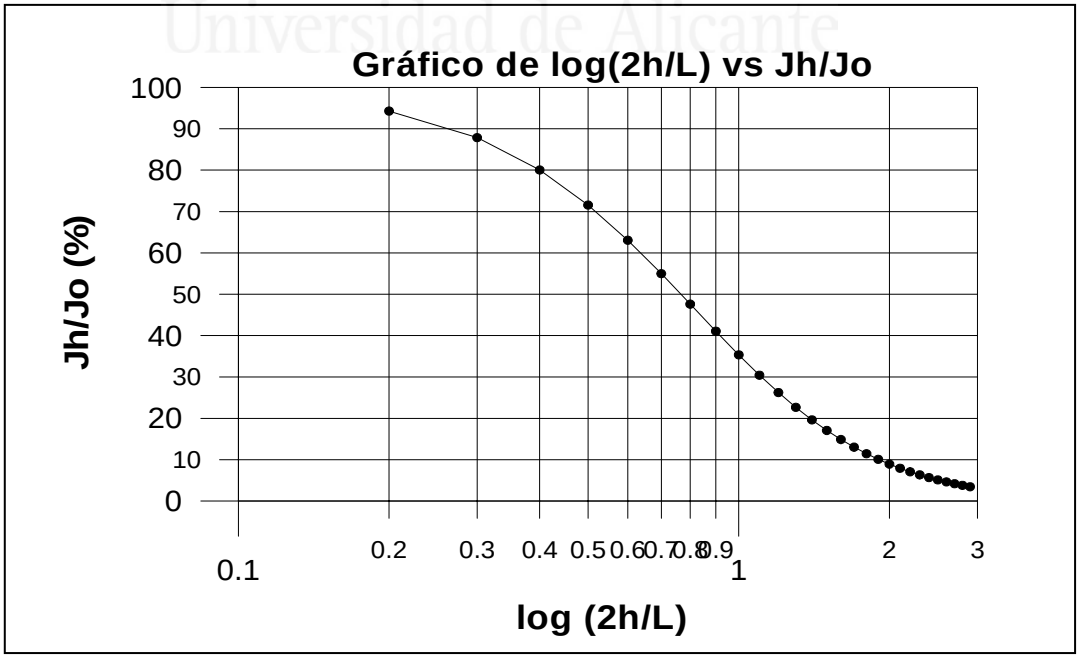


Figura 49. Gráfico de dependencia entre log (2h/L) vs Jh/Jo.

De lo anteriormente expuesto, se puede concluir que la circulación de corrientes disminuye rápidamente con la profundidad y que existe, una profundidad de investigación límite con éstos métodos. Ejemplo para un AB = L = 100 m, por debajo de h = 50 m, sólo circulará aproximadamente el 30 % de la densidad de corriente en superficie, luego la mayor influencia en la distribución de los potenciales en superficie y por ende en los valores de ρ_a lo tendrán las rocas por encima de dicha profundidad.

b) La distribución de la densidad de corrientes en la profundidad, dependerá como se aprecia en la figura 50, de la abertura de la línea de alimentación (L). Así tenemos que cuanto mayor sea L, mayor será la profundidad h en la que podamos obtener una relación Jh / Jo. Ejemplos.

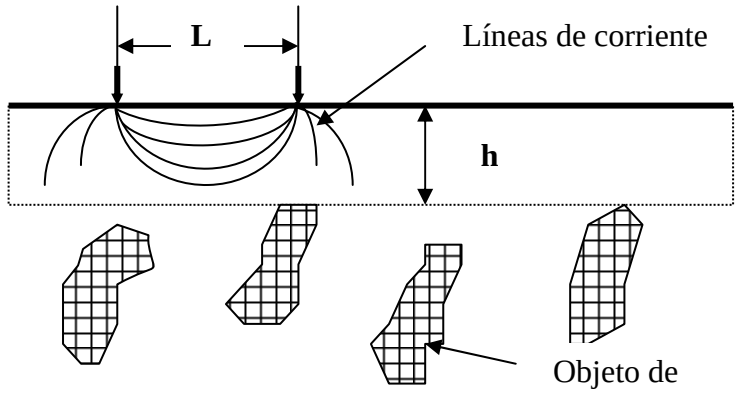
   Para L = 200m y Jh / Jo = 40 %; la profundidad será 90 m.
   Para L = 500m y Jh / Jo = 40 %; la profundidad será 225 m.

Todo lo anteriormente expuesto, se cumple de forma general también en el caso del medio no homogéneo, pero ya no es válida la expresión deducida para el medio homogéneo. Bajo las condiciones de los medios reales, se complica mucho el procedimiento de seleccionar las aberturas óptimas de investigación, para lo cual se recurren a trabajos experimentales mediante sondeos mecánicos paramétricos, etc.

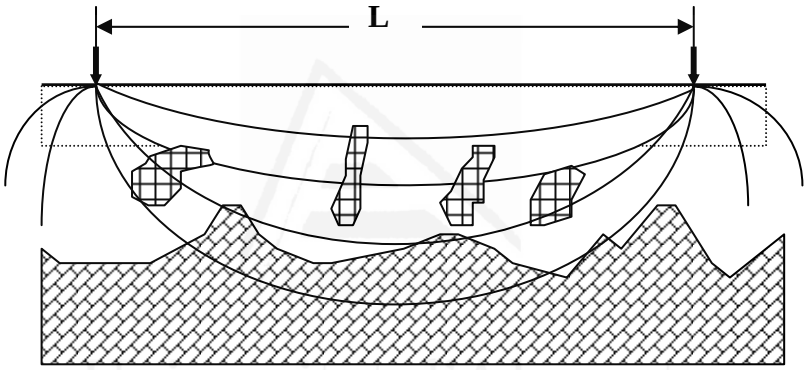
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Ahora bien como conclusión final queremos destacar que la profundidad de investigación de un dispositivo de P.E. de ρ_a, es función de la abertura de la línea emisora y por tanto esta última tiene que ser elegida de forma tal que se garantice que una parte significativa de las corrientes eléctricas circulen hasta las profundidades en que se encuentren los objetos de investigación.

En este sentido debe tratarse que utilizar la abertura óptima de investigación, ya que de lo contrario ello puede acarrear dificultades en la calidad de los datos obtenidos (ver figura 50. Es común el empleo de varias aberturas de la línea de alimentación, generalmente 2.



a. Insuficiente abertura L. No garantiza que la corriente circule por debajo de la profundidad donde se encuentran los objetos de investigación. Estos no son detectados.



b. Abertura excesivamente grande, que hace que influyan las heterogeneidades profundas y enmascaren las anomalías debidas a los objetos de investigación.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 50. Selecciones inadecuadas de la abertura L.

6.4.6.6 Variantes de sondeo eléctrico vertical de resistividad aparente.

En el caso especifico de estas variantes, se estudia la variación de la resistividad aparente (ρ_a) en la profundidad**.** El problema de la elección de las dimensiones del dispositivo y la profundidad de investigación, y señala el hecho que la fracción de corriente eléctrica con que se energiza el terreno, hasta determinada profundidad, aumenta con el incremento de la separación de los electrodos del dipolo emisor (AB), así tendremos que las rocas que mayor influencia tendrán en los valores de la ρ_a

obtenida, son aquellas a través de las cuales, circule una parte significativa de la corriente, o dicho de otra forma, las heterogeneidades de la resistividad eléctrica existentes hasta dichas profundidades serán aquellas que influirán significativamente en la distribución espacial del ΔU_{mn}. Por su parte las rocas ubicadas a una profundidad mayor, apenas influirán en la distribución de los potenciales en la superficie y por ende en los valores de ρ_a.

Así tendremos que el método básico, consistirá en ir incrementando sucesivamente la distancia AB (lo que implica modificar la geometría del dispositivo) para garantizar que cada vez las líneas de corriente circulen a una mayor profundidad, lo que se traduce en ir investigando paulatinamente el corte en la vertical, (ver figura 51), todo lo interior sin mover el punto al cual se refieren las observaciones.

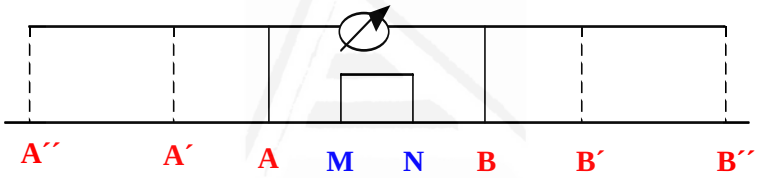


Figura 51. Aberturas sucesivas en un S.E.V

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.4.6.7 Modelos de cortes geoeléctricos y anomalías típicas vinculadas.

6.4.6.7.1 El caso del modelo geoeléctrico estratificado de 2 capas

El punto de partida es un modelo físico – geológico consistente en 2 capas cuya superficie de separación es plana y paralela a la superficie (figura 52) Los 2 medios tienen una resistividad eléctrica respectiva ρ_1 y ρ_2, tal que $\rho_1 \neq \rho_2$. El primer estrato se caracteriza por un espesor h_1, mientras la capa 2 subyacente a la primera se considera que posee un espesor infinito ($h_2 = \infty$).

En superficie se ha colocado un dispositivo Schlumberger tal que AB = L y MN = l, cumpliéndose que L>4,6.l.

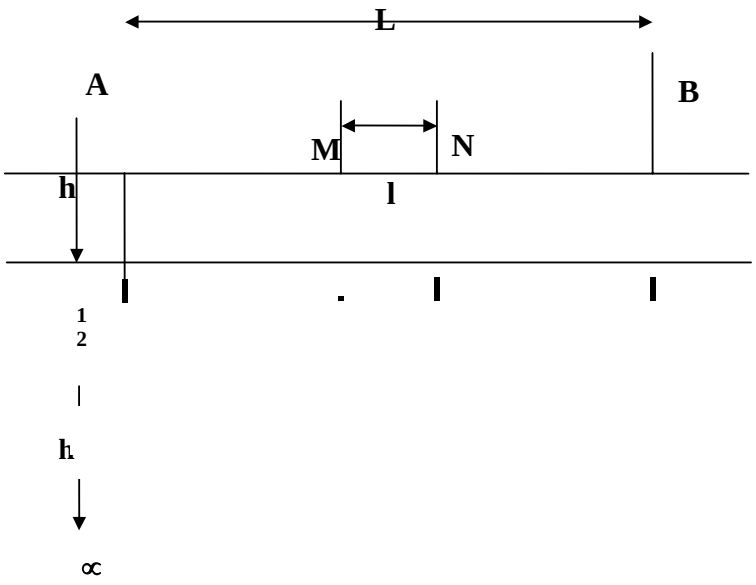


Figura 52. Modelo de corte geoeléctrico de dos capas.

El problema consiste en hallar la expresión que permite establecer la relación entre la resistividad aparente y la abertura entre los electrodos del dispositivo emisor.

Partiendo de la expresión del potencial creado en un punto en la superficie por una fuente puntual en un medio estratificado:

$$U_P = \int_0^\infty \left[\frac{I\rho_1}{2.\Pi} + B_1 \right] J_0(\lambda r) e^{-\lambda Z} d\lambda + \int_0^\infty B_1 J_0(\lambda r) e^{\lambda Z} d\lambda$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Mediante toda una serie de transformaciones se llega a la expresión para determinar el ΔU_{MN} para el dispositivo empleado en el modelo y empleando la expresión para determinar la resistividad aparente; $\rho_a = K.\frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}$, se obtiene la ecuación que define el comportamiento de la resistividad aparente:

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}\left(\frac{AB}{2.h_1}\right)^3}{\left(\left(\frac{AB}{2.h_1}\right)^2 + 4n^2\right)^{3/2}} \right] \text{ donde } K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Veamos algunas consideraciones vinculadas a la expresión anterior:

a) Si se elabora un gráfico de la distancia AB/2 en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la resistividad aparente, la curva obtenida representará la dependencia de la ρ_a en función de la abertura en la línea de alimentación. Que como se ha visto anteriormente está vinculada a la profundidad de investigación. A dicho gráfico se le denomina curva de S.E.V.

b) Para el caso del medio homogéneo, en el cual $\rho_1 = \rho_2$, ello implicará que $K_{12} = 0$ y por tanto la resistividad aparente obtenida $\rho_a = \rho_1$, es decir el valor de la resistividad para cualquier abertura de la línea del emisor AB/2 siempre dará el mismo valor.

c) Si la ρ_a se obtiene con un dispositivo tal, que se cumpla la condición que $AB/2 \leq 2h_1$, ello implicará que casi la totalidad de la corriente circulará por el primer estrato y la resistividad aparente obtenida coincidirá con la resistividad de esa primera capa ($\rho_a = \rho_1$). Este resultado puede entonces demostrarse matemáticamente si se calcula $\lim_{AB/2 \to \infty} \rho_a \to \rho_1$, lo que significa que asintóticamente por la izquierda las curvas de SEV tienden al valor de la resistividad de la primera capa del corte.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

d) Cuando la distancia $AB/2 >> 2h_1$, la mayoría de la corriente circulará por la segunda capa y entonces los valores de la diferencia de potenciales ΔU_{MN} que se miden en superficie por los electrodos de potencial y la resistividad aparente calculada dependerán de la resistividad eléctrica de la capa 2. Puede entonces demostrarse que si se determina $\lim_{AB/2 \to \infty} \rho_a \to \rho_2$, que significa que la curva de resistividad aparente para aberturas muy grandes tenderá asintóticamente por la derecha al valor de ρ_2.

e) En la expresión mostrada para la resistividad aparente para el caso del medio estratificado de 2 capas, el término entre corchetes puede ser representado de una forma simplificada como una función de $AB/2h_1$, por lo que puede escribirse de forma simplificada:

$$\rho_a = \rho_1 . f\left(\frac{AB}{2.h_1}\right)$$

Entonces aplicando logaritmo en ambos miembros:

$$\log \rho_a = \log \rho_1 + \log . f\left(\frac{AB}{2.h_1}\right)$$

y finalmente: $\log {\rho_a}/{\rho_1} = \log . f\left(\log {\frac{AB}{2}}/{h_1}\right)$

f) De esta forma los juegos de curvas teóricas de S.E.V para el modelo de cortes de 2 capas, se confeccionan para diferentes relaciones $\mu_1 = {\rho_2}/{\rho_1}$ y la forma de las curvas serán independientes de los parámetros de la primera capa del corte (ρ_1, h_1). Así tendremos que una variación en la resistividad de la primera capa, como su logaritmo se resta del logaritmo de ρ_a, solo desplazaría la curva hacia arriba o abajo, por otra parte una variación en h_1 desplaza la curva hacia delante o atrás en el eje de las abscisas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Podemos entonces concluir para el caso del modelo de corte de 2 capas:

- Para aberturas de la línea de alimentación de corriente, en las cuales se cumple que $AB/2 \leq h_1$, los valores de la resistividad aparente calculada ρ_a tiende al valor de ρ_1.

- Cuando las aberturas $AB/2 > h_1$, los valores de ρ_a obtenidos tienden al valor de la ρ_2.

- Entonces una curva de S.E.V para un medio de 2 capas, presentará 2 asíntotas, una a la izquierda que tiende al valor de ρ_1 y otra a la derecha que tiende al valor de ρ_2. Para las aberturas intermedias entre los valores extremos antes señalados,

la ρ_a tomará valores intermedios entre dichas asíntotas y la curva se caracterizará por una inflexión.

❖ En la figura 53 se muestran los dos tipos de curvas de 2 capas que pueden existir. En la curva superior se cumple que la resistividad eléctrica de la primera capa es inferior a la de la segunda ($\rho_1 < \rho_2$), mientras que en la curva inferior se cumple lo contrario ($\rho_1 > \rho_2$).

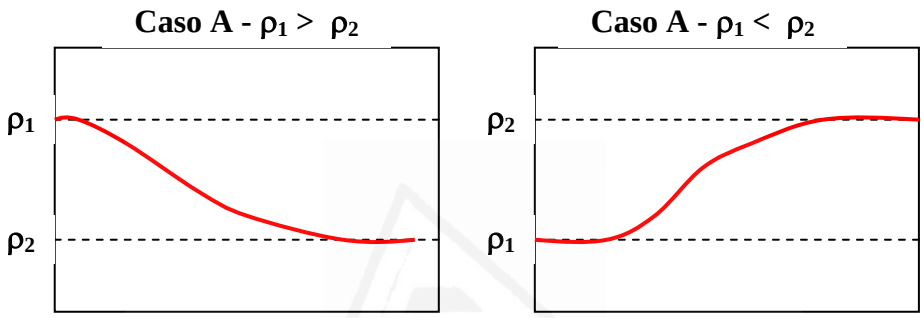


Figura 53. Tipos de curvas de SEV de 2 capas.

6.4.6.7.2 El caso del modelo geoeléctrico estratificado de 3 capas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El modelo físico geológico correspondiente a un corte estratificado de 3 capas, se muestra en la figura 54, los parámetros que caracterizan a este tipo de corte son:

- ρ_i = resistividad eléctrica de la capa i.
- h_i = espesor de la capa i. La última capa se le asigna un espesor infinito.
- m_i = Profundidad del piso de la capa i. A la última capa se le asigna una m. infinita.

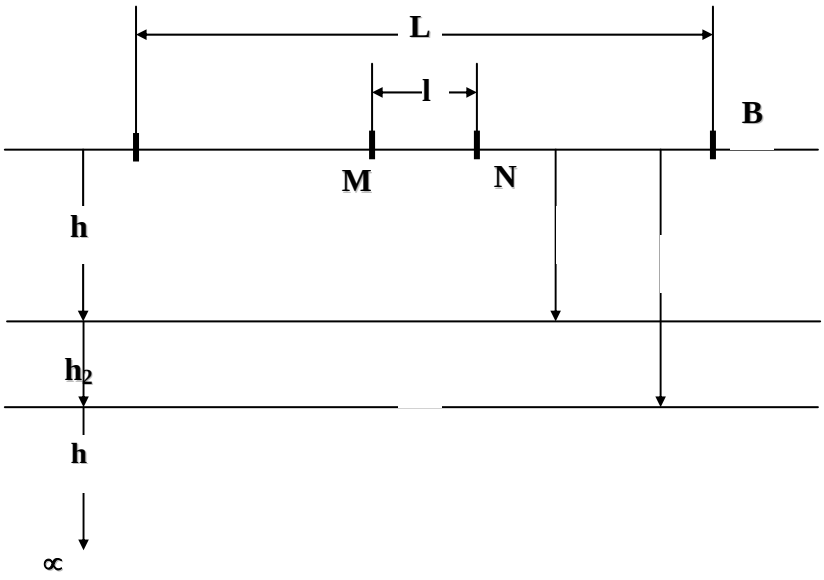


Figura 54. Modelo de corte estratificado de 3 capas.

En dependencia de la relación entre las resistividades de las capas ρ_1: ρ_2 : ρ_3, se distinguen 4 tipos básicos de anomalías de 3 capas, las que se muestran en la figura 55.

6.4.6.7.3 El caso del modelo geoeléctrico estratificado de 4 capas

En lo que corresponde a los modelos de cuatro capas, también se han desarrollado estudios teóricos a partir de los cuales se han confeccionados juegos de anomalías. La nomenclatura empleada para las curvas de más de tres capas, es utilizando los símbolos establecidos para los tres tipos de capas y haciendo un agrupamiento de 3 en 3 se pueden clasificar las mismas. Por ejemplo en el caso de curvas de 4 capas, se pueden distinguir 8 tipos diferentes (tabla 22). Por su parte en la figura 56, se muestra un ejemplo de una curva de cuatro capas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

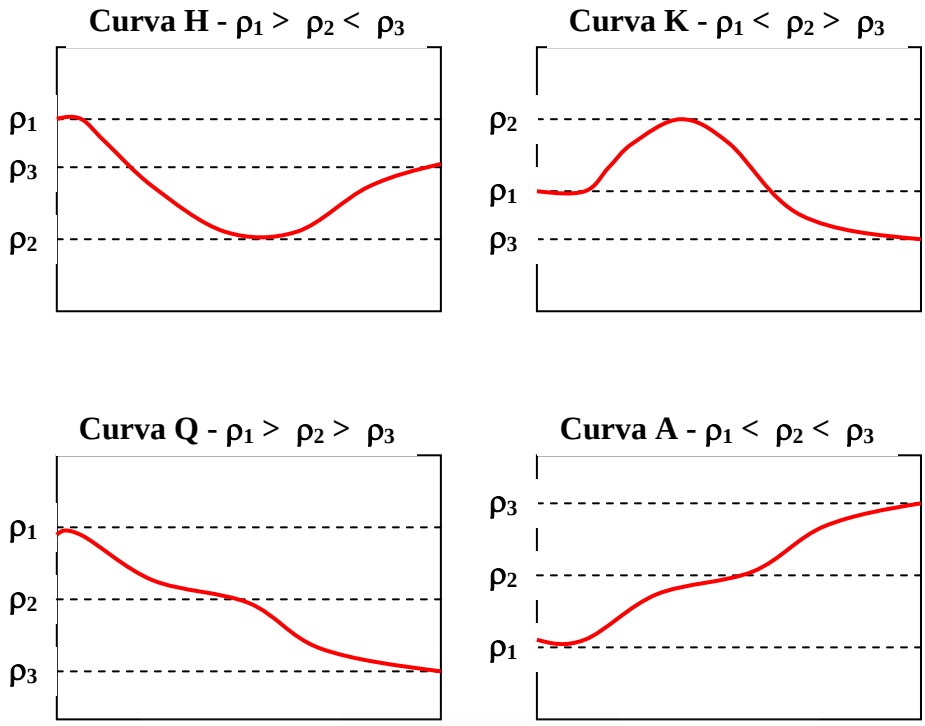


Figura 55. Anomalías típicas de S.E.V para modelos de 3 capas.

tipos de curvas de 4 capas	relación de resistividades
HA	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$
HK	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$
QH	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$
QQ	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$
AK	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$
AA	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$
KH	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$
KQ	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$

Tabla 22. Tipos de curvas que se pueden adquirir en un perfil de cuatro capas.

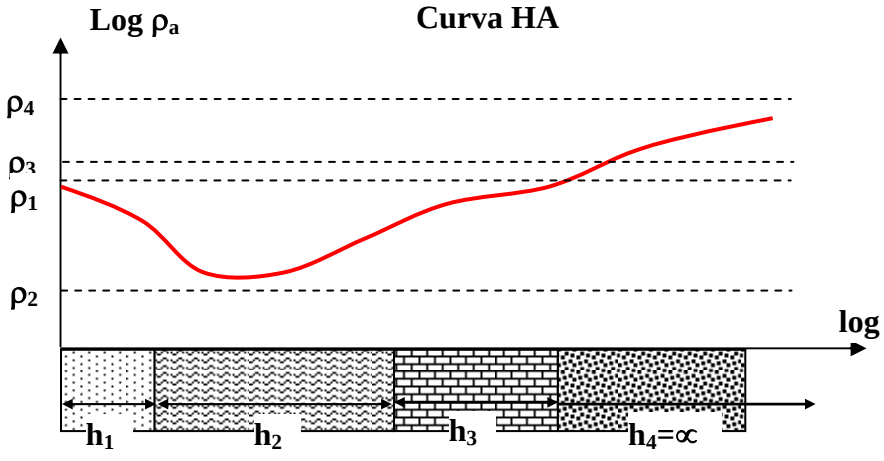


Figura 56. Ejemplo de anomalía de S.E.V de 4 capas.

6.4.6.8 La adquisición de Datos.

6.4.6.8.1 El problema de la selección de las distancias sucesivas en la línea del emisor.

Tomando en consideración la importancia que posee en el éxito de una campaña de S.E.V, hemos entendido necesario detenernos brevemente en el mismo.

Como se había planteado anteriormente las curvas de S.E.V se plotean en gráficos bilogarítmicos, por lo que en el eje de las abscisas se plotea el log AB/2. Con vistas a garantizar que la densidad de puntos en la misma sea homogénea, las aberturas AB/2 deben planificarse con un incremento según una progresión geométrica, esto es, que cada punto se diferencie de otro en una abscisa log n, como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$\log AB_i/2 = \log AB_{i-1}/2 + \log n$$

o lo que es lo mismo:

$$AB_i/2 = n.AB_{i-1}/2$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La expresión anterior corresponde a una progresión geométrica. La expresión para calcular el parámetro n es:

$$n = e^{2.302585 * L/M}$$

Donde:
L: es la distancia promedio en mm que se desea para las abscisas de los puntos en el gráfico.

M: módulo del gráfico bilogorítmatico en mm.

Veamos un ejemplo para un dispositivo lineal de zona de exploración central Schlumberger:

Abertura inicial: $AB_{i/2}$ = 3 m
Distancia puntos en el gráfico (L) = 8mm
Modulo del papel (M) = 62.5 mm
Aplicando la expresión de n =1.342765.

En la tabla 23 se recogen las aberturas sucesivas que se calculan según la expresión propuesta.

Para el caso específico del dispositivo Schlumberger se hace necesario también planificar, cada cierto incremento del AB/2, aumentar también la abertura MN/2, ya que con el incremento de la distancia entre los electrodos del emisor los ΔU_{MN} medidos en los electrodos de potencial disminuyen significativamente, llegando a ser prácticamente imperceptibles.

No.	AB/2 (m)	No.	AB/2 (m)	No.	AB/2 (m)
1	3.0	6	13.09	11	57.16
2	4.03	7	17.60	12	76.75
3	5.40	8	23.61	13	103.06
4	7.26	9	31.70	14	138.39
5	9.75	10	42.57	15	185.83

Tabla 23. Ejemplo de secuencia de aberturas de un S.E.V.

Para el control de las distancias en las aberturas sucesivas de los AB/2 se pueden seguir varios procedimientos:

- Ubicar marcas con cintas adhesivas de colores en el mismo cable del dispositivo emisor.

- Emplear cintas métricas que se colocan en la superficie del terreno y ubicar los electrodos de emisión de corriente en las distancias correspondientes a partir del centro del dispositivo.

Cualquiera de los procedimientos anteriores facilita el control de esta operación.

6.4.6.8.2 Metodología Básica de Campo

La distancia entre los centros de los S.E.V, depende del carácter y etapa de la investigación, así como la estructura geológica del área.

En el caso de estudios de detalles en levantamientos de áreas, se deben ubicar preferentemente redes rectangulares o cuadradas de forma tal, que el lado menor de la red no debe ser superior al doble de la profundidad a que se espera se encuentran los objetos de investigación, con el objetivo de garantizar una adecuada correlación entre los puntos del S.E.V. La densidad de la red puede ser menor, en caso que la tectónica y variaciones laterales no sean muy fuertes (lo que se puede evaluar previamente empleando alguna variante de calicatas eléctricas de ρ_a).

La alineación de los puntos para ubicar los centros de los S.E.V, así como la dirección de orientación de las líneas del dispositivo deben planificarse cuidadosamente. Deben elegirse direcciones con la mayor homogeneidad lateral y que el terreno sea lo más llano posible.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La determinación de la abertura máxima ($AB/2_{max}$) a emplear en la línea emisora depende de la profundidad hasta la cual se supone se encuentre los objetos de investigación y debe ser tal que garantice su estudio con eficacia, para ello resulta recomendable la revisión de los resultados de otros S.E.V realizados en el área con anterioridad y/o efectuar S.E.V experimentales, de ser posible en las cercanías de sondeos mecánicos y comparar los resultados obtenidos.

Durante el proceso de mediciones resulta muy importante el chequeo sistemático de las curvas, con el objetivo de evitar saltos bruscos de los valores de ρ_a, debiendo tratarse de obtener curvas lo más suaves posibles.

6.4.6.8.3 Procesamiento, presentación e interpretación de los resultados.

El procesamiento y presentación básica que se aplica a los resultados de un S.E.V, consiste en la obtención de la curva, ya sea en un gráfico bilogorítmatico (dispositivos Schlumberger y Werner) o semilogarítmico (dipolo- dipolo). En la figura 57, se muestra una curva típica de S.E.V para un dispositivo Schlumberger.

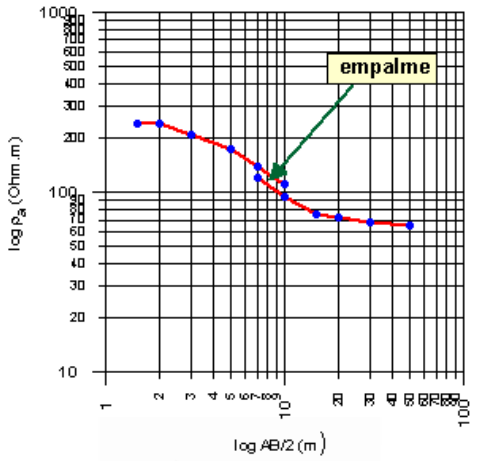


Figura 57. Curva típica de S.E.V.

Una vez que se han trazado todas las curvas de S.E.V se procede al proceso de interpretación que consta con dos etapas: cualitativa y cuantitativa.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La interpretación cualitativa se fundamenta en la relación que existe entre el carácter del corte geológico y algunas características de las anomalías de S.E.V, que son las siguientes:

1. Forma de la anomalía - Depende del número de capas del corte y de las relaciones entre resistividades de las mismas.

2. Valores Extremos ($\rho_{a(máx)}$ /$\rho_{a(min)}$) . Sólo en el caso de curvas K y H. Dependerán del contraste de la capa intermedia y de su espesor.

3. Abscisas de los valores extremos - Solo en curvas tipo H y K. Depende del espesor de la capa intermedio.

4. Punto de inflexión en la anomalía - Depende del número de capas en el corte. Teóricamente el numero de puntos de inflexión debe ser igual a n-1 capas pero en el caso de anomalías con segmentos de tipo Q y A, los puntos de inflexión no se aprecian bien o incluso no existen en lo absoluto.

Los resultados de la interpretación cualitativa son, entre otros (Conde, 1996):

- ❖ Mapas de tipos de curvas
- ❖ Mapas de isolíneas de conductividad longitudinal (S).
- ❖ Mapas de contornos de valores extremos de la resistividad aparente ($\rho_{a(máx)}$; $\rho_{a(min)}$).
- ❖ Mapas de isolíneas de las abcisas que corresponden a los valores extremos de la resistividad aparente (para curvas tipos K y H).
- ❖ Cortes de contornos de resistividad aparente. Se elaboran con los datos obtenidos en perfiles de S.E.V. La escala vertical se toma logarítmica o también en función de AB/4
- ❖ Cortes de derivadas normalizadas de resistividad aparente.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.4.6.8.3.1 Los objetivos de la etapa de Interpretación Cuantitativa son:

Determinación para cada punto de S.E.V de la potencia (h_i), profundidad del piso (m_i) y la resistividad ∫i de las capas que componen el corte geoeléctrico, en dicho punto. A continuación y mediante la correlación entre los puntos de S.E.V en perfiles se elaboran los cortes geoeléctricos. El resultado final consistirá en la interpretación geológica de los mismos con el empleo de información aportada por otros métodos de investigación. En general se cumplen dos técnicas fundamentales para efectuar la interpretación cuantitativamente de las curvas de S.E.V.

a) Método de comparación de las anomalías con juegos de curvas teóricas:

La esencia de estas técnicas, consiste en graficar las anomalías obtenidas de las observaciones, en papel transparente bilogoritmatico o semilogarítmico (en dependencia del tipo de dispositivo empleado), posteriormente se superpone dicho grafico a los juegos de curvas teóricas, hasta hallar aquella que más coincidencia tenga con la anomalía observada, una vez seleccionada la curva teórica se toma como parámetros del corte geoeléctrico en el punto de S.E.V aquellos que le corresponde.

b) Método de aproximaciones sucesivas:

Con el desarrollo vertiginoso de las técnicas computación en las últimas décadas, se ha desarrollado toda una serie de software de inversión, que se emplean en la interpretación cuantitativa de S.E.V de una forma interactiva. En general a de estos programas se les brindan los datos de campo a través de los puntos de comunicación de las computadoras y mediante un ambiente interactivo se pueden fijar y/o modificar los parámetros del corte obtenidos e ir perfeccionando los parámetros del corte geoeléctrico en cada punto de S.E.V, hasta obtener la mejor solución a la tarea inversa, de aquí su nombre de aproximaciones sucesivas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Actualmente en el mercado, los equipos de geoeléctricidad, como parte del mismo, se suministran el software de interpretación de SEV correspondientes. Tomando ello en consideración no hemos querido entrar en detalles acerca de este software.

Finalmente las condiciones favorables para una interpretación cuantitativa efectiva en la variante de S.E.V de ρ_a son:

1. Los objetivos de investigación se diferencian significativamente de resto de las rocas del corte de su resistividad.

2. Buzamiento de los cuerpos estratiformes sea pequeño preferiblemente dentro de los siguientes límites:

   - Menores de 15° a 20° (Dispositivos Schlumberger y Wenner)

- ❖ Menores de 28° (Dispositivos dipolares axiales)

3. El número de capas del corte geoeléctrico no sea superior a 4.

4. Relieve del terreno sea lo más llano posible.

6.5 RESULTADOS.

6.5.1 Interpretación cualitativa del S.E.V.

El primer paso en la interpretación consistió en la identificación de los tipos de curvas, las que se muestran en la tabla 24.

Como se aprecia del total de los 14 S.E.V realizados, sólo en 2 casos corresponden a modelos de cortes geoeléctricos de 5 capas, el resto reportó, hasta la abertura máxima del dispositivo de alimentación AB, modelos de 4 capas.

Perfil	Nombre S.E.V	X (m)	Y (m)	Tipo Curva
Factoría	Factoria1	706780	4221259	QQQ
	Factoria2	706683	4221261	QQ
	Factoria3	706487	4221287	QQ
	Factoria4	706434	4221298	QQ
	Factoria5	706366	4221300	QQ
	Factoria6	706319	4221309	QQ
Vivero Fonteta	Fonteta	705771	4219821	HK
	Fonviv3	706039	4219745	HK
	Fonviv2	706210	4219694	QHK
	Fonviv1	706326	4219665	HK
	Vivero	706467	4219622	KQ
Salidero	Salider1	706016	4213870	KQ
	Salider2	705869	4213887	KQ
	Salider3	705806	4213913	KQ

Tabla 24. Clasificación de los tipos de curvas de SEV registrados en las dunas de Guardamar del Segura.

En la tabla 25 aparece un resumen de la clasificación general de los modelos de cortes geoeléctricos que se detectan en los perfiles de observación realizados.

Tipo de curva de S.E.V	Relación de resistividades	Nº de curvas
QQQ	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 > \rho_5$	1
QHK	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 > \rho_5$	1
QQ	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	5
HK	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$	3
KQ	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	4

Tabla 25. Distribución por tipos de curvas de S.E.V.

Las principales consideraciones respecto a las tipologías de curvas de S.E.V obtenidas en el área son las siguientes:

- Predominio de modelos de cortes geoeléctricos de 4 capas, hasta las profundidades de investigación alcanzadas.

- El perfil de Factoría, se caracteriza en todos los puntos de S.E.V por la presencia de un patrón de disminución sistemática de la resistividad eléctrica con la profundidad, que se demuestra por la presencia de un predominio de las curvas del tipo QQ.

- El perfil intermedio Vivero – Fonteta se caracteriza por un predominio de curvas de 4 capas del tipo HK, indicando que a diferencia del perfil anterior, aparece una tercera capa geoeléctrica de mayor resistividad eléctrica, que el resto de las presentes en esa zona de estudio.

- El perfil de Salidero, se caracteriza por la presencia de modelos de cortes geoeléctricos del tipo KQ en todos sus puntos, indicando la presencia de una segunda capa de mayor resistividad eléctrica, que el resto de las presentes en esa zona.

- En todos los casos e independientemente del tipo de curva presente, se destaca un comportamiento en la rama final representada por modelos tipo K y Q, que indican la presencia de una capa de muy baja resistividad.

6.5.2 Interpretación cuantitativa del S.E.V.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El objetivo central de esta etapa de la interpretación, consistió en la elaboración de los cortes geoeléctricos y sobre la base de los resultados de los sondeos mecánicos disponibles, establecer las posibles correlaciones entre las capas geoeléctricas y las diferentes tipologías de suelos y rocas presentes en el área.

En las tablas 26, 27 y 28, se muestran los resultados de la aplicación de una inversión con el software IPI 2 WIN de los perfiles de Factoría, Vivero–Fonteta y Salidero respectivamente. Estas tablas de datos constituyeron precisamente las bases de datos que fueron empleadas para la elaboración de los cortes geoeléctricos empleando la aplicación SURFER versión.8.2 de la Golden Software.

Una vez elaborados los cortes geoeléctricos se procedió a la comparación de los mismos con la descripción de los sondeos mecánicos disponibles en el área (Blázquez, 2003), con el objetivo de correlacionar las capas geoeléctricas con las principales tipologías de suelos y rocas presentes en la región y dar un sentido geológico a la interpretación de los sondeos eléctricos verticales de resistividad aparente.

A continuación se describen los principales aspectos de los cortes geoeléctricos elaborados:

Perfil	Nombre S.E.V	X (m)	Y (m)	No capa	h (m)	m (m)	(Ohm.m)
Factoría	Factoria1	706780	4221259	1	0,75	0,75	402
				2	4,25	5	2,07
				3	19,8	24,8	0,506
				4			0,0092
	Factoria2	706683	4221261	1	0,75	0,75	1536
				2	1,46	2,21	90,8
				3	0,46	2,67	0,307
				4	4,7	7,37	10,2
				5			0,0337
	Factoria3	706487	4221287	1	0,75	0,75	1347
				2	1,02	1,77	348
				3	12,2	13,97	12,4
				4			0,0128
	Factoria4	706434	4221298	1	0,841	0,841	9386
				2	2,69	3,531	2866
				3	10,9	14,431	25,2
				4			0,124
	Factoria5	706366	4221300	1	0,88	0,88	2304
				2	1,52	2,4	38,1
				3	22,2	24,6	4,49
				4			0,0096
	Factoria6	706319	4221309	1	1,18	1,18	3598
				2	6,18	7,36	633
				3	0,639	7,999	435
				4			0,094

Tabla 26. Resultados de la interpretación cuantitativa perfil Factoría

Perfil Factoría.

En la figura 58, se muestra la ubicación espacial del perfil de Factoría, así como el corte geoeléctrico.

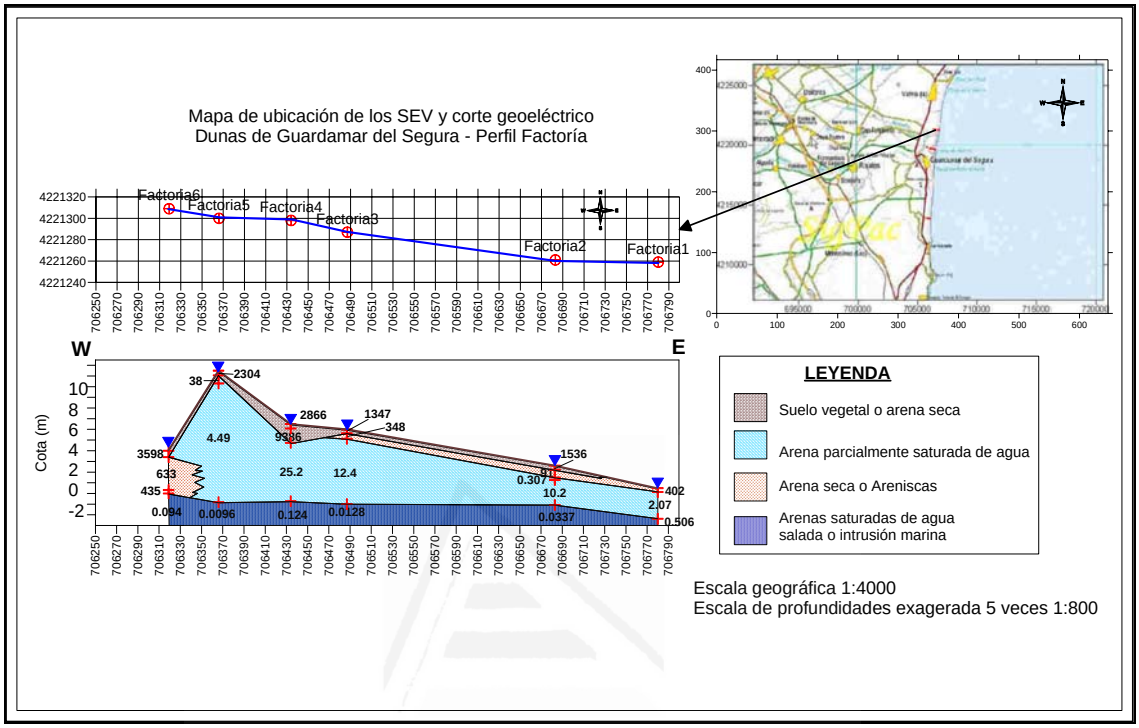


Figura 58. Mapa de ubicación de los S.E.V y corte geoeléctrico Dunas de Guardamar del Segura-perfil factoria.

Las principales características de este perfil son las siguientes:

- Presenta una primera capa geoeléctrica con espesores muy pequeños (0.75 a 1.18 m) y resistividad eléctrica entre 1536 a 9386 Ohm.m, que representa la capa de mayor ρ en el corte. Esta capa aparece en todos los puntos de S.E.V a excepción del punto Factoría1 ubicado en el extremo E del perfil hacia la costa.

- Capa geoeléctrica caracterizada por valores de resistividad eléctrica que oscila entre 91 y 633 Ohm.m y espesores entre 0.75 a 1.46 m. Esta capa geoeléctrica subyace a la anterior a la altura de los puntos de S.E.V Factoría1, Factoría2 y Factoría3 y parece ser que se acuña hacia el W, al nivel de los puntos de S.E.V Factoría4 y Factoría5 y de nuevo aparece en el SEV Factoría6 al extremo W del

perfil como la capa 3 del corte geoeléctrico con un espesor muy superior (6.81 m).

- Capa geoeléctrica de bajos valores de resistividad aparente (2.07 - 38 Ohm.m) y grandes espesores que oscilan entre 4.25 - 23.7 m. Esta capa no se detecta en el punto de S.E.V Factoría6 en el extremo W del perfil y su espesor va disminuyendo desde el punto Factoría5 hacia el punto Factoría1 ubicado este último en la costa al E del perfil.

- Capa geoeléctrica caracterizada por valores de resistividad eléctrica extremadamente bajos (0.0096 – 0.505 Ohm.m). Aparece en todos los puntos de S.E.V del perfil y representa en todos los casos la última capa del corte.

Perfil	Nombre SEV	X (m)	Y (m)	No Capa	h (m)	m (m)	(Ohm.m)
Vivero	Fonteta	705771	4219821	1	1,23	1,23	82
Fonteta				2	1,77	3	14
				3	3,55	6,55	74,9
				4			0,129
	Fonviv3	706039	4219745	1	1,31	1,31	1276
				2	1,2	2,51	3,51
				3	3,58	6,09	25,2
				4			2,18
	Fonviv2	706210	4219694	1	0,838	0,838	3742
				2	2,52	3,358	698
				3	1,52	4,878	147
				4	4,68	9,558	2135
				5			0,936
	Fonviv1	706326	4219665	1	0,849	0,849	2556
				2	2,95	3,799	255
				3	3,62	7,419	2774
				4			3,83
	Vivero	706467	4219622	1	0,75	0,75	20
				2	0,223	0,973	443
				3	2,23	3,203	5
				4			2,6

Tabla 27. Resultados de la interpretación cuantitativa perfil Vivero-Fonteta.

Perfil Vivero – Fonteta

En la figura 59, se muestra la ubicación espacial del perfil de Vivero - Fonteta, así como el corte geoeléctrico.

- Capa geoeléctrica de alta ρ entre 1276 a 3742 Ohm.m que se detecta en la parte superior del corte en los puntos de S.E.V Fonviv1, Fonviv2 y Fonviv3, no se detecta en los puntos de SEV Vivero al extremo E del perfil y en el S.E.V Fonteta en el extremo W del perfil. Los espesores de esta capa oscilan entre 0.84 a 1.31 m.

- A continuación se observa una fuerte discontinuidad lateral en el corte geoeléctrico entre los S.E.V Fonviv3 al W y el Fonviv2 al E. En el tramo del perfil correspondiente a los S.E.V Fonteta y Fonviv3 se observa a continuación la presencia de una capa geoeléctrica con valores de resistividad eléctrica que oscila entre 3.5 a 82 Ohm.m y espesores entre 6.09 a 6.55 m. Por su parte en los S.E.V Vivero, Fonviv1 y Fonviv2, se detecta la presencia de una capa geoeléctrica con una ρ entre 148 a 698 Ohm.m y espesores que oscilan entre 0.22 a 6.2 m, acuñándose significativamente hacia la costa al E.

- A continuación aparece en los puntos Fonviv1 y Fonviv2 una capa de muy alta resistividad eléctrica con un rango entre 2136 a 2774 Ohm.m y espesores entre 3.62 a 4.68 m.

- A lo largo de todo el perfil aparece finalmente en todos los puntos de S.E.V una última capa geoeléctrica de muy baja resistividad eléctrica con rango entre 0.129 a 5 Ohm.m.

Perfil	Nombre S.E.V	X (m)	Y (m)	No Capa	h (m)	m (m)	(Ohm.m)
Salidero	Salider1	706016	4213870	1	1,58	1,58	496
				2	1,16	2,74	47,6
				3	2,48	5,22	936
				4			0,554
	Salider2	705869	4213887	1	1,61	1,61	1716
				2	1,19	2,8	21,6
				3	3,99	6,79	330
				4			0,67
	Salider3	705806	4213913	1	1,04	1,04	2163
				2	0,202	1,242	8,67
				3	6,94	8,182	332
				4			27,9

Tabla 28. Resultados de la interpretación cuantitativa perfil Salidero

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

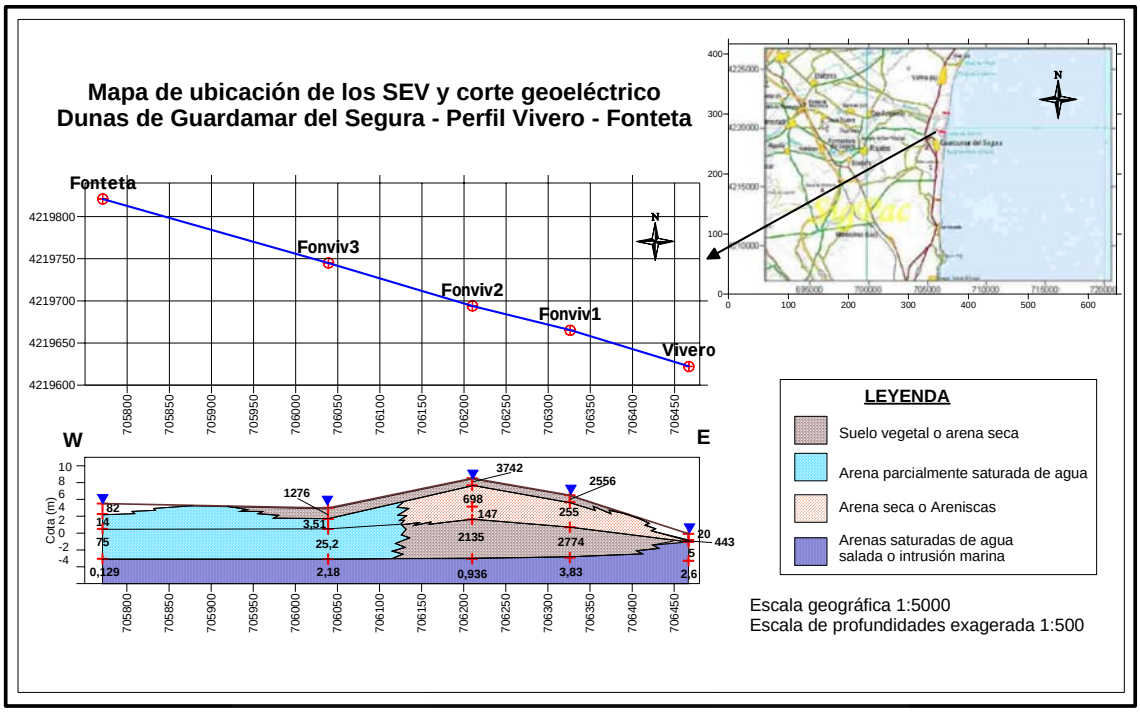


Figura 59. Mapa de ubicación de los S.E.V y corte geoeléctrico Dunas de Guardamar del Segura Perfil vivero-fonteta.

Perfil Salidero

En la figura 60, se muestra la ubicación espacial del perfil de Salidero, así como el corte geoeléctrico. A continuación se presentan las características principales:

- En todos los puntos de S.E.V se detecta una primera capa geoeléctrica con valores extremos de la ρ entre 496 a 2163 Ohm.m, con los valores creciendo desde la costa (E) hacia el interior (W). Se aprecia además que posee un espesor bastante homogéneo a lo largo de todo el perfil con valores entre 1.04 a 1.58 m.

- Capa geoeléctrica 2 que aparece en todos los puntos de S.E.V, con valores de resistividad eléctrica que oscila entre 8.2 a 47.6 Ohm.m y espesores entre 0.202 a 1.19 m. Esta capa se caracteriza por una disminución de su resistividad eléctrica desde la costa al E hacia el interior al W del perfil, además a la altura de los S.E.V Salider1 y Salider2 su espesor es bastante homogéneo y se acuña hacia el S.E.V Salider3.

- Capa geoeléctrica 3, detectada en todos los puntos de S.E.V, con valores de resistividad entre 330 a 936 Ohm.m y espesores entre 2.48 a 6.94 m, apreciándose un incremento sistemático en su espesor desde la costa al E, hacia el interior en el W.

- Capa geoeléctrica 4, que también es detectada en todos los puntos de S.E.V, con valores de resistividad extremadamente bajos en un rango entre 0.55 a 27.9 Ohm.m, aumentando su resistividad eléctrica hacia el interior al W.

Del resultado de la interpretación de los cortes geoeléctricos anteriores se definen las siguientes correlaciones entre las capas geoeléctricas y los resultados de las descripciones de los sondeos mecánicos existentes en el área de investigación:

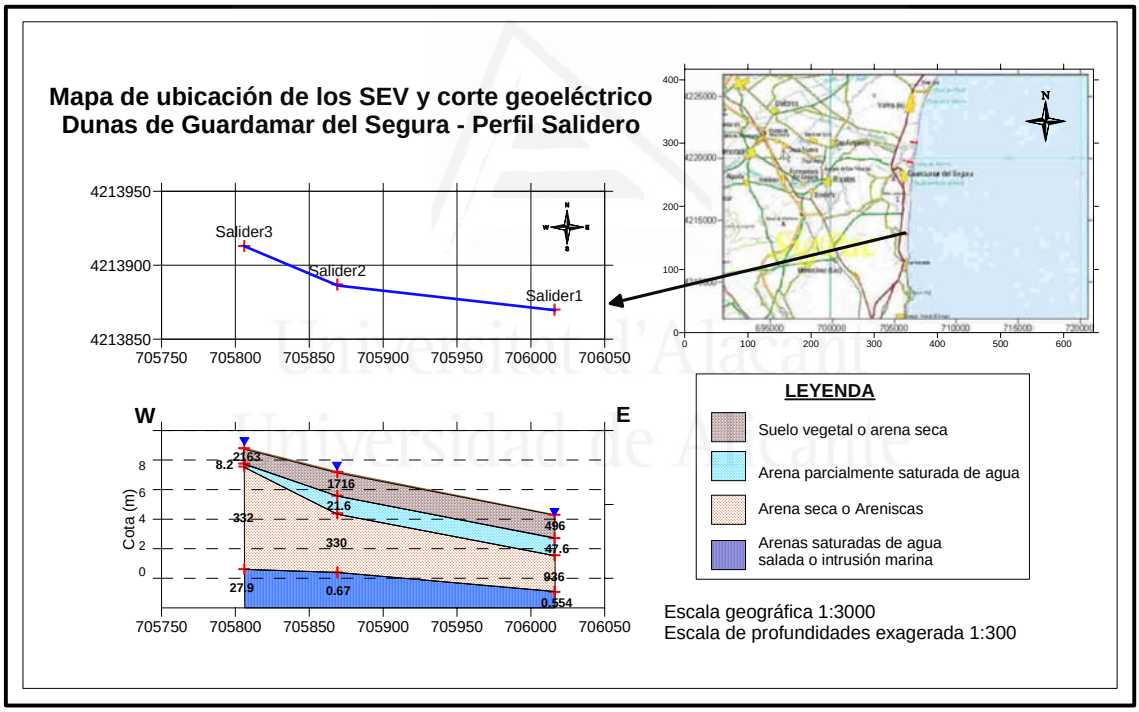


Figura 60. Mapa de ubicación de los S.E.V y corte geoeléctrico Dunas de Guardamar del Segura Perfil salidero.

Capa I – Representada por suelo vegetal o arenas muy secas. Estas aparecen en todos los cortes geoeléctricos como la primera capa, a excepción de los puntos de SEV Vivero y Fonteta del perfil Vivero – Fonteta y el Factoría1, donde no se detecta. Esta capa se caracteriza por valores de resistividad eléctrica entre 496 – 9386 Ohm.m, aunque su ρ promedio es de 2750 Ohm.m y normalmente posee valores por encima de los 1300

Ohm.m. Se caracteriza por espesores pequeños que oscilan entre 0.75 a 3.5 m y promedio de 1.3 m.

Capa II – Se asocia a las arenas parcialmente saturadas de agua. Este grado parcial de saturación de agua, condiciona precisamente que esta capa se caracteriza por valores bajos de la resistividad eléctrica, en un rango entre 2.07 a 75 Ohm.m y ρ promedio de 22 Ohm.m. aunque sus valores más frecuentes son superiores a los 8 Ohm.m. Su espesor promedio de 6.7 m. Esta capa no se detecta en los S.E.V Factoria6, Vivero, Fonviv1 y Fonviv2.

Capa III – Representada por litologías que son areniscas o arenas secas. Se correlaciona con capas geoeléctricas detectadas por los S.E.V de resistividades entre 91 – 936 Ohm.m, con promedio de 421 Ohm.m. Esta capa posee un rango de espesores entre 0.75 a 6.94 m y espesor promedio de 2.6 m. No es detectada en los puntos de S.E.V Factoría4, Factoría5, Fonviv3 y Fonteta.

Capa IV – Representada por arenas saturadas de agua salada o intrusión marina. Aparece muy claramente en todos los puntos de S.E.V como la última capa del corte geoeléctrico. Se caracteriza por valores de resistividad eléctrica extremadamente bajas, con un rango entre 0.0096 a 27.9 Ohm.m, con valor promedio de 2.9 Ohm.m, aunque sus valores más frecuentes son inferiores a 1 Ohm.m. El techo de esta capa se encuentra a profundidades que como promedio son de los 8.86 m y un rango que oscila entre 0.97 a 24.6 m.

Tomando en consideración el análisis realizado anteriormente se establecen los rangos de resistividades para las litologías presentes en la zona de los trabajos (tabla 29).

No Capa	Litología	Rango de resistividades
I	Suelo vegetal o arena seca	$\rho > 1300$ Ohm.m
II	Arena parcialmente saturada de agua	8 Ohm.m $< \rho <$ 100 Ohm.m
III	Areniscas o arenas secas	100 Ohm.m $< \rho <$ 1000 Ohm.m
IV	Arenas saturadas de agua salada o intrusión marina	$\rho <$ 8 Ohm.m

Tabla 29. Litologías presentes y rangos de resistividades eléctricas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El próximo paso en la interpretación de los resultados del método de resistividad eléctrica tuvo como objetivo modelar el comportamiento de la tendencia de algunos de los parámetros de yacencia de las principales capas, objeto de investigación relacionadas en la Tabla 30. Para ello fue elaborada una base de datos que incluye datos espaciales (ver tabla 31), así como atributos no espaciales.

Perfil	Nomb S.E.V	X (m)	Y (m)	Esp. C-1	Techo C-2	Esp. C-2	Techo C-4
Factoría	Factoria1	706780	4221259			4,25	5
	Factoria2	706683	4221261	0,75	0,75	4,7	7,37
	Factoria3	706487	4221287	0,75	0,75	12,2	13,97
	Factoria4	706434	4221298	3,531	3,531	10,9	14,43
	Factoria5	706366	4221300	0,88	0,88	22,2	24,6
	Factoria6	706319	4221309	1,18	1,18		7,999
Vivero Fonteta	Fonteta	705771	4219821			5,32	6,55
	Fonviv3	706039	4219745	1,31	1,31	4,78	6,09
	Fonviv2	706210	4219694	0,838	0,838		9,55
	Fonviv1	706326	4219665	0,849	0,849		7,41
	Vivero	706467	4219622				0,97
Salidero	Salider1	706016	4213870	1,58	1,58	1,16	5,22
	Salider2	705869	4213887	1,61	1,61	1,19	6,79
	Salider3	705806	4213913	1,04	1,04	0,202	8,182

Tabla 30. Base de datos empleada para la elaboración de mapas de contornos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Con el objetivo de abordar esta tarea, se procedió a la selección de la función de cercanía apropiada. Tomando en consideración que:

- El objetivo era estudiar la tendencia general del comportamiento de los parámetros no espaciales de algunos horizontes guías.

- Existencia de pocos puntos de observación.

En este caso debía emplearse un interpolador no exacto (con suavizamiento), los cuales se caracterizan por reducir los efectos de variabilidad de pequeña escala entre los puntos de datos cercanos.

Sobre la base del problema planteado se decidió emplear el interpolador de la Mínima Curvatura. Este interpolador ajusta una superficie linealmente elástica que pasa a través de los puntos de control - PC (puntos donde se tienen los datos georeferenciados), con

un mínimo radio (distancia) o sea genera una superficie lo mas suavizada posible, mientras intenta respetar los PC. El proceso de interpolación en este caso se realiza paso a paso por iteraciones, hasta que se alcanza un valor inferior a un residuo máximo. Para controlar este proceso de iteraciones de este interpolador, se emplean 2 parámetros:

- N = # de iteraciones máximos -> se estima como igual a 1 ó 2 veces el número de nodos de la red a interpolar.

- MR = Residuo máximo -> Posee las mismas unidades que el parámetro no espacial que se desea interpolar (en este caso espesor o profundidad del piso de los horizontes guías – metros). Para estimar este parámetro se utiliza la expresión siguiente: $MR = 0.001 * (Z_{máx} - Z_{mín})$. Donde $Z_{máx}$ y $Z_{mín}$ son los valores máximos y mínimos de los datos originales observados para el parámetro no espacial que se desea modelar.

Con la aplicación de este procedimiento se obtienen en cada caso las redes regulares de datos interpolados. Fueron elaboradas redes cuadradas de 50 x 50 m. También se tuvo en consideración que la ubicación de los perfiles tenía una dirección casi Este – Oeste, por lo que se emplearon reglas de búsqueda (Search Rules) de los puntos acordes a esta distribución, que se condicionaron a un radio variable – elipse de búsqueda = 0,4.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Como ocurre con la aplicación de estos métodos, en algunos casos las redes obtenidas presentaron artefactos de grideo (gridding artifacts) que en lo fundamental se manifestaron por la presencia en las redes de algunos nodos con valores interpolados negativos. Para corregir estos errores se procedió a la "limpieza" de las redes, aplicando filtros adecuados.

Reporte de profundidad del Techo Capa-1

Según el reporte de los datos originales empleados para la elaboración de la red, no se existe una correlación significativa entre las coordenadas espaciales y el espesor de la capa-1 (capa vegetal o arenas secas).

Según el modelo ajustado (Grid Information Report) se caracteriza por un espesor promedio 1,28 m y una mediana de 1,28 m, mientras el rango de variación oscila entre 0 a 3,98 m, presenta una desviación estándar de 0,52 m y un coeficiente de variación del 41 %.

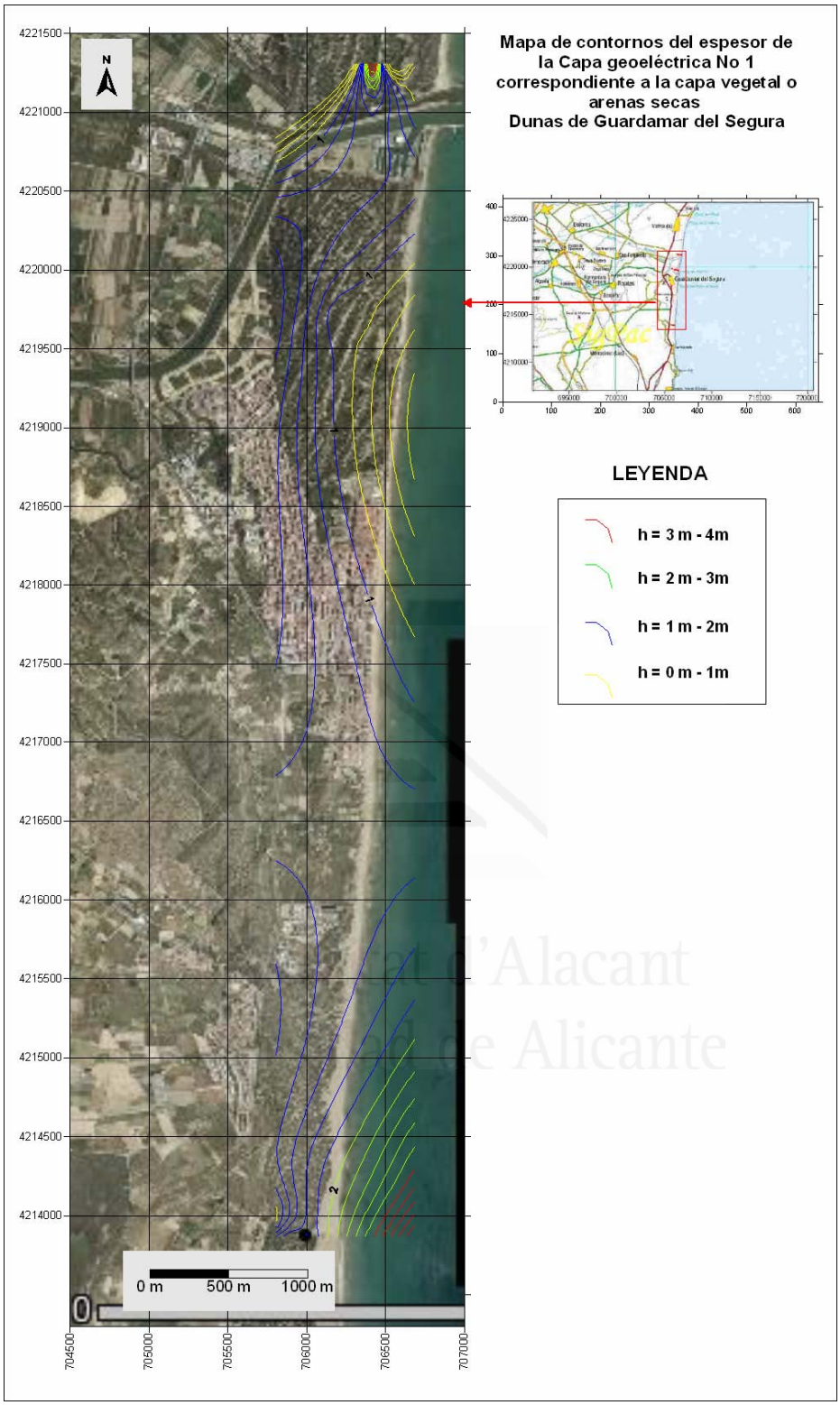
La calidad del modelo ajustado se estimó a partir del análisis de residuos (tabla 31), donde se aprecia que la desviación promedio entre el espesor de esta capa a partir del modelo y los puntos de control, fue de 0,24 m (24 cm), con lo que se considera validado el modelo de interpolación empleado.

Parámetro	Espesor-Capa 1	Techo-Capa2	Espesor Capa-2	Techo Capa-4
Number of values	11	11	8	12
Minimum	-1,154841977	-1,437277076	-1,244524558	-9,829712918
Maximum	0,634990326	0,634990326	1,175650319	6,925954907
Range	1,789832303	2,072267402	2,420174877	16,75566782
Mean	-0,063188334	-0,118951468	-0,141824217	-0,50809087
Median	-0,003218768	-0,015111023	-0,202604399	-0,127784041
Standard error	0,129162136	0,147326385	0,247878763	1,046974029
Average deviation	0,24494069	0,254163288	0,506974411	1,795582894
Standard deviation	0,428382341	0,488626342	0,701107017	3,626824426

Tabla 31. Resumen estadístico del análisis de residuos.

Universidad de Alicante

Una vez validado el modelo se construyó el mapa de contornos para el espesor de la capa-1, el que se muestra en el mapa 1 de contornos espesor capa-1, a partir del cual se pueden llegar a las siguientes consideraciones:



Mapa 1. Contornos espesor capa-1.

- La tendencia en la distribución espacial del espesor de esta capa, muestra que predominan en el área los valores entre 0 a 2 m.

- Hacia el ESTE en la costa, el espesor disminuye hacia la porción NORTE, mientras que hacia el extremo SUR ocurre lo contrario, o sea en la medida que nos acercamos a la costa se manifiesta un incremento suave del espesor de este horizonte. A la altura de la coordenada Norte-4216500, se observa una ruptura en este patrón de comportamiento.

- Los gradientes horizontales en el cambio de los espesores de este estrato, son en general muy suaves (≈ 1,6 m/km). Al nivel del perfil Factoría, se aprecia un gradiente menos suave.

- En sentido general, como se aprecia en el mapa, los contornos siguen un alineamiento más o menos paralelos a la línea de la costa.

Profundidad del Techo Capa-2

En los datos originales empleados para la elaboración de la red, no se aprecia una correlación significativa entre las coordenadas espaciales y la profundidad del techo de la capa-2 (arenas parcialmente saturadas de agua).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Según el modelo ajustado (Grid Information Report) se caracteriza por una profundidad del techo promedio 1,4 m y una mediana de 1,38 m, mientras el rango de variación oscila entre 0 a 4,56 m, presenta una desviación estándar de 0,68 m y un coeficiente de variación del 92,6 %.

La calidad del modelo ajustado se estimó a partir del análisis de residuos (tabla 31), donde se aprecia que la desviación promedio entre la profundidad del techo de esta capa a partir del modelo y los puntos de control, fue de 0,25 m (25 cm), con lo que se considera validado el modelo de interpolación empleado.

Una vez validado el modelo se construyó el mapa de contornos para la profundidad del techo de la capa-2, el que se muestra en el mapa 2 de contornos techo capa-2, a partir del cual se pueden llegar a las siguientes consideraciones:

- A la altura de la coordenada Norte-4216500, se observa una diferencia en el comportamiento de la profundidad del techo de la capa. Mientras en la porción Norte el patrón de comportamiento indica una disminución suave de la profundidad del techo de esta capa en dirección a la costa (Este), hacia la porción Sur ocurre lo contrario, un incremento de la profundidad del techo hacia la costa.

- La tendencia en la distribución espacial de la profundidad del techo de este estrato, muestra que en la porción hacia el Norte del área predominan los valores entre 0 a 2 m, mientras que hacia el Sur se aprecia un rango de variación mas amplio llegando a valores superiores a los 2 m.

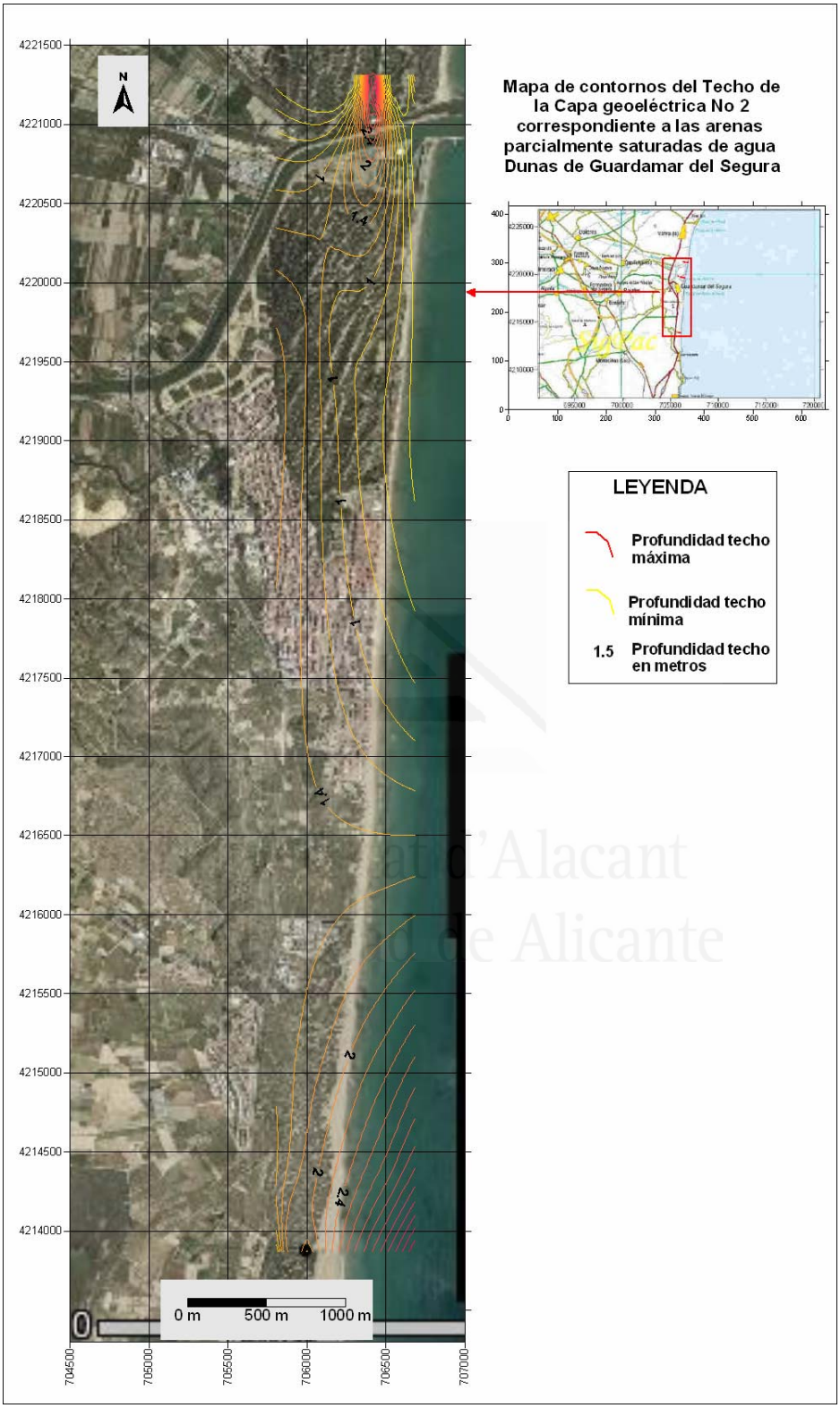
- Los gradientes horizontales en el cambio de la profundidad del techo de la capa-2, son en general muy suaves (≈ 0,8 m/km). Al nivel del perfil Factoría, así como hacia la porción Sur se aprecia un ligero incremento en este parámetro.

- En sentido general, como se aprecia en el mapa, los contornos siguen un alineamiento mas o menos paralelo a la línea de la costa, sobre todo en la porción hacia el Norte del sector estudiado.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Espesor de la capa-2

En el análisis del reporte de los datos originales empleados para la elaboración de la red, se aprecia una cierta correlación entre la coordenada Norte y los valores del espesor de la capa-2, que indican un coeficiente de correlación = +0.65, indicando una tendencia al incremento hacia el Norte del espesor de este estrato. Por su parte no se aprecia una correlación significativa entre la coordenada Este y el espesor de la capa-2 (arenas parcialmente saturadas de agua).



Mapa 2. Contornos techo capa-2.

Según el modelo ajustado (Grid Information Report) se caracteriza por un espesor promedio 6,5 m y una mediana de 3,12 m, mientras el rango de variación oscila entre 0 a 72 m, presenta una desviación estándar de 10,5 m y un coeficiente de variación del 160 %.

La calidad del modelo ajustado se estimó a partir del análisis de residuos (tabla 32), donde se aprecia que la desviación promedio entre el espesor de esta capa a partir del modelo y los puntos de control, fue de 0,5 m (50 cm), con lo que se considera validado el modelo de interpolación empleado.

Una vez validado el modelo se construyó el mapa de contornos para el espesor de la capa-2, el que se muestra en el mapa 3 de contornos espesor capa-2, a partir del cual se pueden llegar a las siguientes consideraciones:

- La tendencia en la distribución espacial del espesor de esta capa, muestra que en la porción hacia el Norte del área, en las cercanías del perfil Factoría, predominan los valores más grandes del espesor de este estrato y con tendencia al crecimiento hacia el N-W, también en esta zona se aprecian los más grandes gradientes. Por su parte a partir de la coordenada N-4219500 y hacia toda la parte Sur del sector estudiado se aprecian gradientes muy suaves y valores que oscilan entre 1 a 8 m.

- Mientras en la zona Norte del área se observa que el espesor de este estrato decrece hacia la costa (Este), en la mayoría de la zona y a partir de la coordenada N-4219500 y hacia el Sur se aprecia que el espesor de este estrato crece ligeramente hacia la costa.

- En sentido general, como se aprecia en el mapa, los contornos siguen un alineamiento mas o menos paralelo a la línea de la costa, sobre todo en la porción centro y Sur del sector estudiado.

Techo de la capa-4.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En el análisis del reporte de los datos originales empleados para la elaboración de la red, no se aprecia una correlación significativa entre las coordenadas espaciales y la profundidad del techo de la capa-4 (arenas saturadas de agua salada o intrusión marina).

Según el modelo ajustado (Grid Information Report) se caracteriza por un espesor promedio 6,06 m y una mediana de 6.05 m, mientras el rango de variación oscila entre 0 a 21.4 m, presenta una desviación estándar de 4,5 m y un coeficiente de variación del 66.9 %.

La calidad del modelo ajustado se estimó a partir del análisis de residuos (tabla 31), donde se aprecia que la desviación promedio entre el espesor de esta capa a partir del modelo y los puntos de control, fue de 1,8 m, con lo que se considera validado el modelo de interpolación empleado.

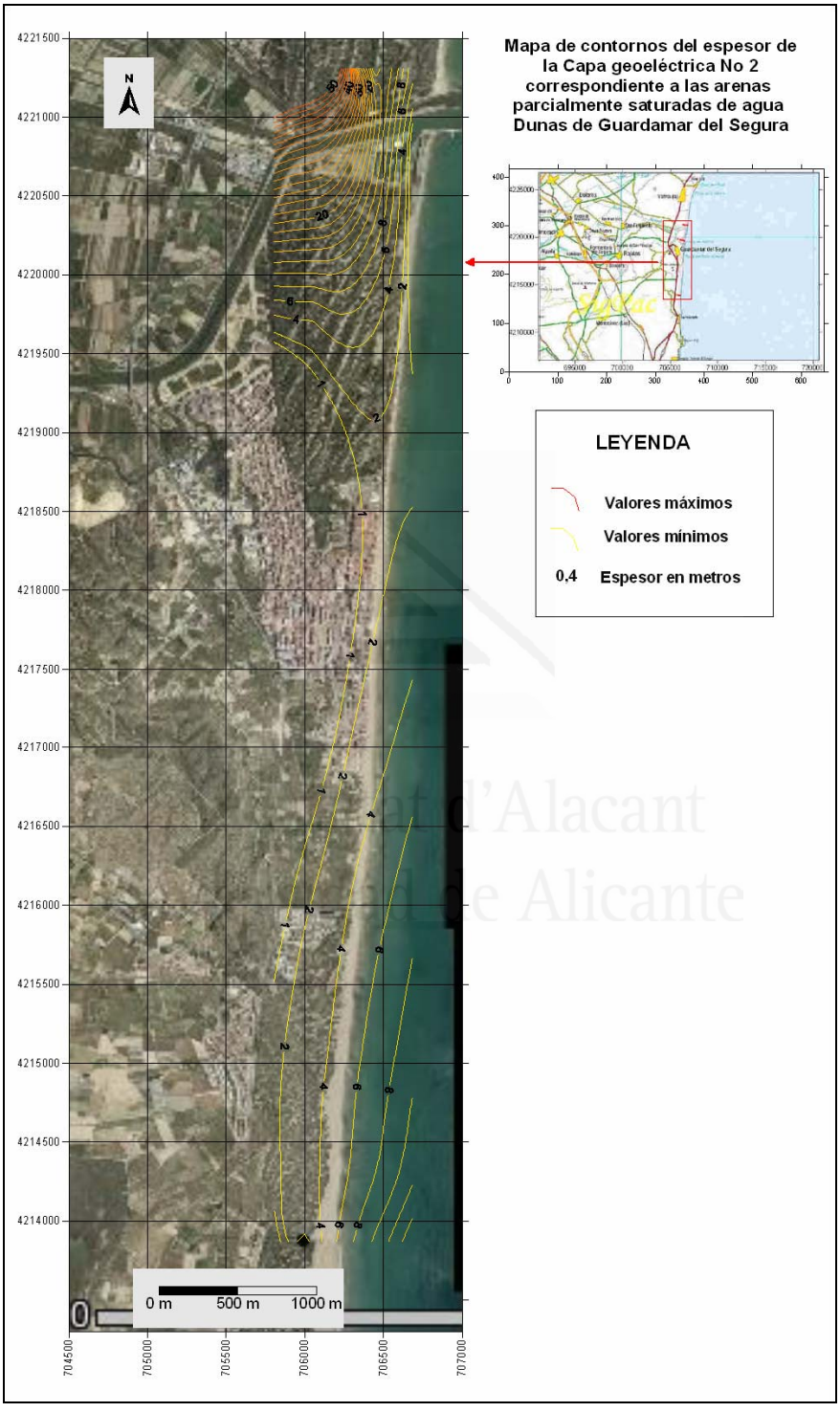
Una vez validado el modelo se construyó el mapa de contornos para la profundidad del techo de la capa-4, el que se muestra en el mapa 4 de contornos de la profundidad del techo capa-4, a partir del cual se pueden llegar a las siguientes consideraciones:

- La tendencia en la distribución espacial de la profundidad del techo de esta capa, muestra que en la porción hacia el Norte del área, en las cercanías del perfil Factoría, predominan los valores más grandes de la profundidad del techo de esta capa y con tendencia al crecimiento hacia el centro del perfil de Factoría, también en esta zona se aprecian los más grandes gradientes. Por su parte a partir de la coordenada N-4219000 y hacia toda la parte Sur del sector estudiado se aprecian gradientes muy suaves y valores que oscilan entre 2 a 11 m.

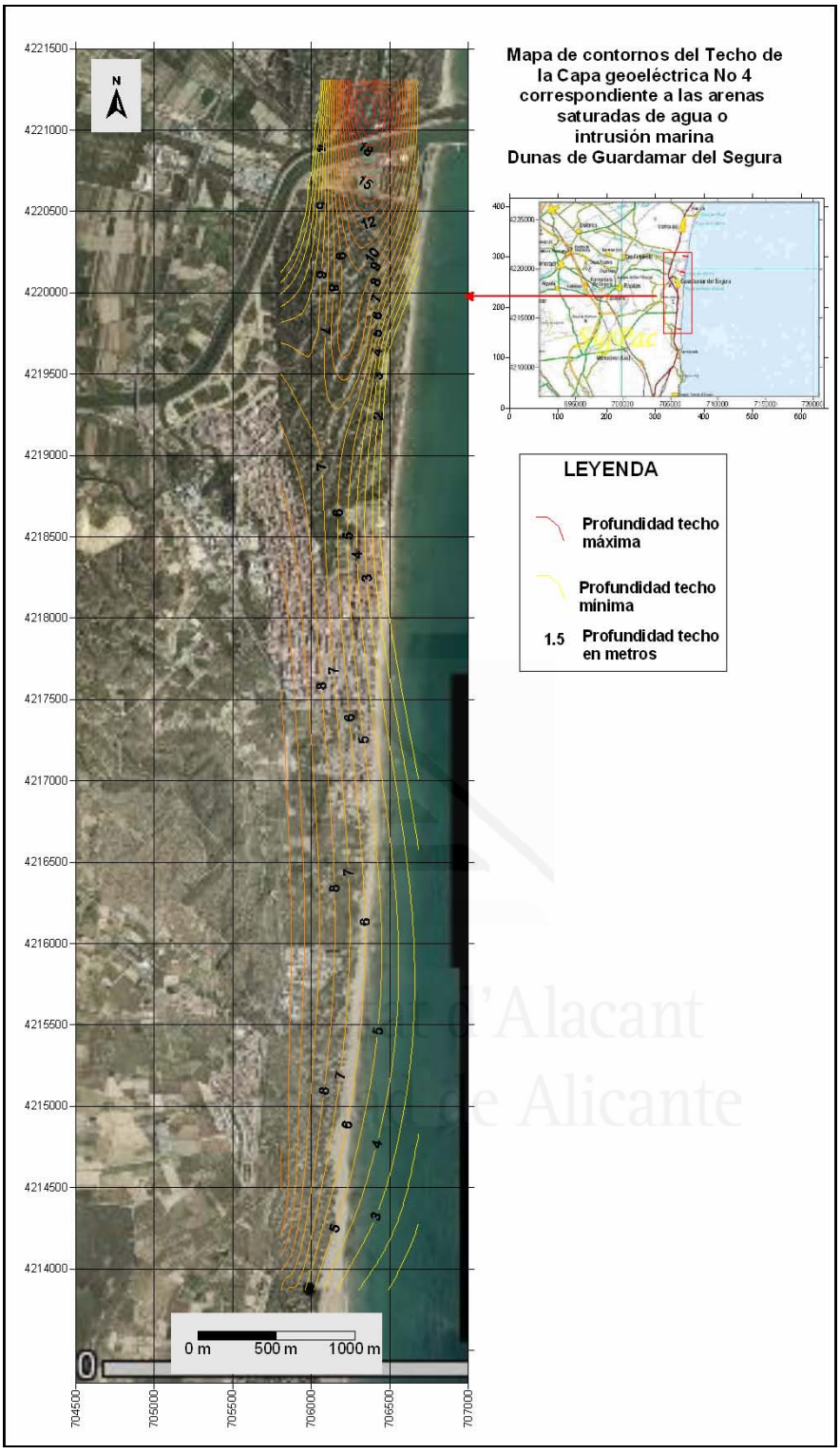
- Mientras en la zona Norte del área se observa que el espesor de este estrato decrece a partir del centro del perfil de Factoría hacia la costa (Este) y hacia el Oeste, en la mayoría de la zona y a partir de la coordenada N-4219000 y hacia el Sur se aprecia que la profundidad a que se encuentra este estrato va decreciendo paulatinamente hacia la costa.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

❖ En sentido general, como se aprecia en el mapa, los contornos siguen un alineamiento paralelo a la línea de la costa, sobre todo en la porción centro y Sur del sector estudiado.



Mapa 3. Contornos espesor capa-2.



Mapa 4. Contornos de la profundidad del techo capa-4.

Los resultados de la interpretación de los cortes geoeléctricos y de correlaciones existentes en cada capa geoeléctrica ponen en evidencia la existencia de una zona de mayor contenido de humedad, capa que tiene características de alta resistividad las cuales están necesariamente asociadas a una litología compuesta por areniscas que permiten retener un porcentaje alto de agua. Garcia, 2005 ha observado después de un evento de precipitación, el agua se infiltra y se concentra en capas no superiores a 1 m, asimismo argumenta que los valores de humedad no varían significativamente a lo largo del año. Esta característica corroboraría aún más nuestros resultados.

La permanencia de este alto contenido de humedad de esta capa no está muy clara por lo menos en este ecosistema, dado que algunos investigadores como Bernabé, 2004 y Garcia, 2005 atribuyen este contenido de agua a ascensos capilares.

6.6 Evolución del nivel freático.

El estudio de la relación entre las oscilaciones del nivel freático y la calidad del agua subterránea es uno de los temas que actualmente está cobrando un mayor auge, a medida que ha ido aumentando el conocimiento sobre las complejas interacciones entre las aguas subterráneas, las aguas superficiales, el suelo y su relación con el régimen de explotación o el clima. En nuestro caso interesaba comprobar si las variaciones del nivel estaban asociadas a estímulos externos (precipitación), de igual manera este estudio contribuyo a reforzar los resultados obtenidos en los S.E.V.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La red de pozos del sistema dunar fue construida durante el periodo comprendido entre abril de 2002 y mayo de 2004, a partir de esa fecha empieza el periodo de estudio. Estos estaban situados en cotas que variaban desde los dos m.s.n.m hasta los nueve m.s.n.m.

Las variaciones del nivel freático se producen por diversas vías entre las que podemos destacar la infiltración del agua de lluvia, de las aguas superficiales y también por trasferencias subterráneas. Conocer la evolución de un acuífero en términos de variabilidad espacial y temporal, su caracterización y modificación por actuaciones territoriales sigue siendo un aspecto difícil cuando se requiere precisión (Custodio, 1997a).

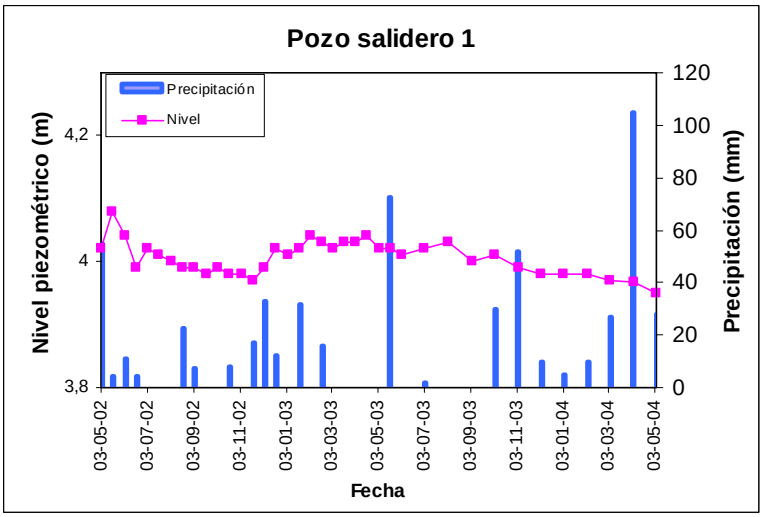
Las precipitaciones de la zona de estudio al igual que en la zona semiárida española presentan una gran variabilidad mensual, estacional y anual. Comparando el valor medio anual de precipitación de largas series en estaciones metereológicas próximas a Guardamar del Segura (1961-1990), publicados en el Atlas Climático de Comunidad Valenciana (Clavero Paricio, 1994) se observa por ejemplo que en el año 1961 Alicante presentó una precipitación de 167,9 mm, mientras en Elche se recogieron 138,5 mm. En 1971 llovió 621,9 mm en Alicante, sin embargo en Elche solo llegó 283,8 mm. Para el periodo de 1983 se presentaron lluvias del orden de 130 mm en Elche y Alicante 282 mm. Esto demuestra una vez más la inestabilidad de las lluvias en esta parte de la península.

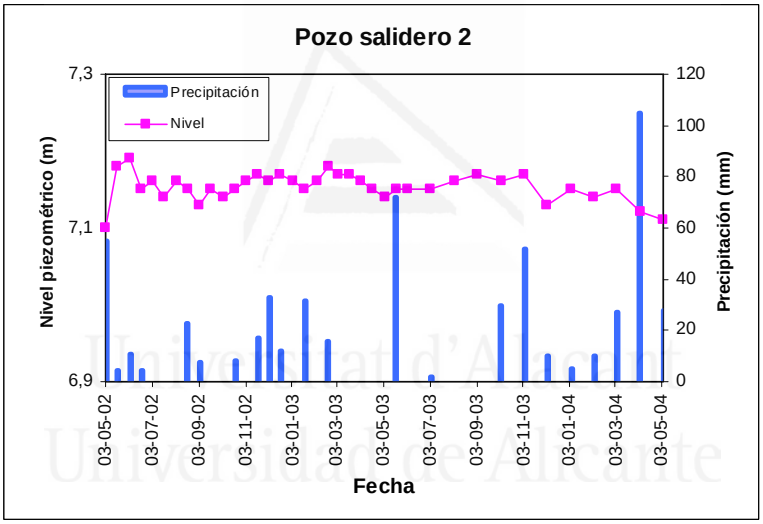
Por otro lado Chirino (2003) sostiene que las características de las precipitaciones en esta parte de la península son: baja intensidad, bajo volumen y la corta duración, así mismo este autor señala que estas limitarían las variaciones freáticas.

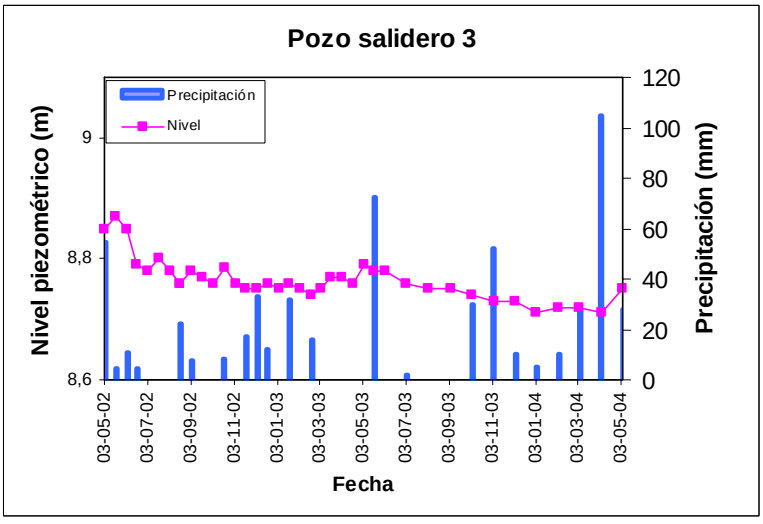
En la figura 61 se presenta la evolución del nivel de cada uno de los pozos muestreados junto con la precipitación en el ecosistema dunar. En estas graficas se observa la influencia que tienen las lluvias sobre el nivel freático. Se aprecian claramente los ascensos de los pozos vivero y fonteta durante los periodos de más precipitación, es decir en los meses mayo del 2003, noviembre del 2003 y abril del 2004 donde las lluvias mensuales superaban los 50 $L.m^{-2}$, hemos de anotar que estos estaban ubicados en el mismo perfil, el primero situado a escasos 100 metros del mar y el segundo a 200 metros del río Segura. Si analizamos los periodos secos observamos que el pozo vivero es el que sufre los mayores descensos de nivel sobre todo en los meses de junio, julio y agosto de 2003. Las variaciones del nivel freático sufridas en cada uno de los pozos es del orden centimétrico.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

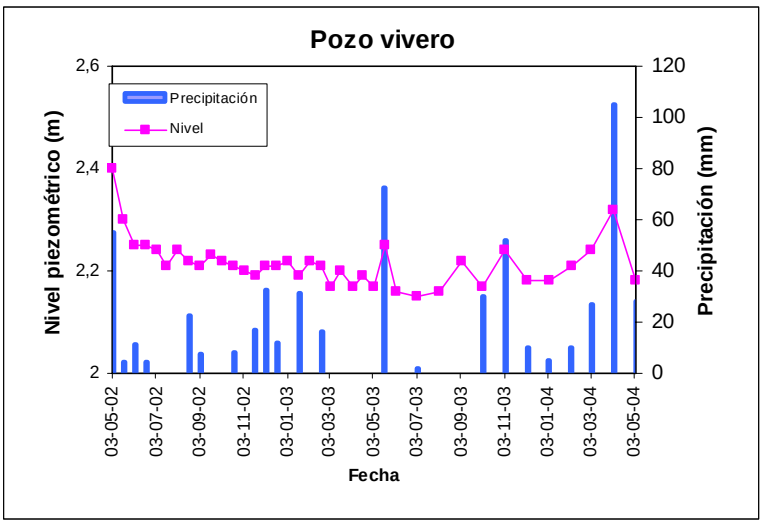
Figura 61. Evolución del nivel freático en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura y precipitación durante el periodo abril de 2002 a mayo de 2004.

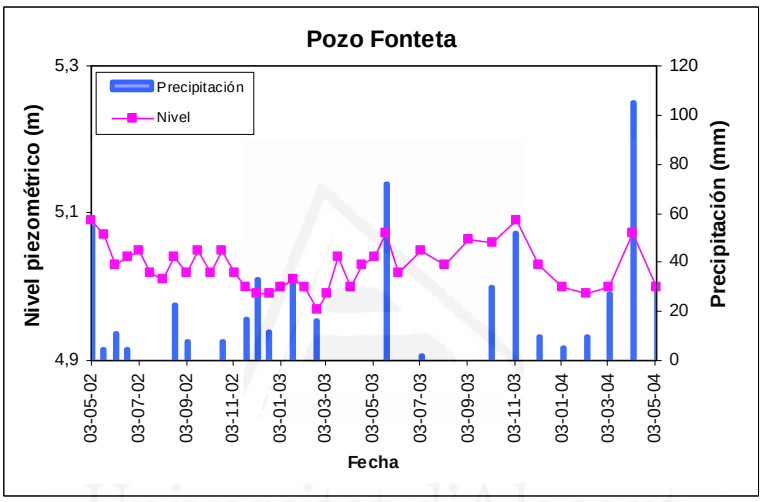






Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

6.7 Características químicas del agua de subsuelo.

La características hidroquímicas de las aguas subterráneas se estudian desde el punto de vista de las relaciones entre las distintas variables fisicoquímicas, su distribución espacial y la evolución hidroquímica temporal a fin de establecer de manera cualitativa y en ocasiones cuantitativa cuál es el origen de éstas (Martín, 2001). Partiendo de estas premisas desarrollaremos la parte final de este capitulo.

En este epígrafe se realiza una caracterización de algunos iones del nivel freático, así mismo se incluye la evolución hidroquímica de cinco pozos ubicados dentro del ecosistema dunar, información que permite tener una idea aproximada de las aguas freáticas del sistema dunar.

La disolución del agua y su elevada reactividad hacen que el agua natural contenga gran cantidad de sustancias disueltas, la gran mayoría de las cuales se encuentran en estado iónico. La procedencia de estos es la siguiente:

Ión cloruro.

Este procede de:

- Lavados de terrenos de origen marino; las aguas congénitas y fósiles.
- Agua lluvia, especialmente en zonas próximas a la costa.
- Mezcla con agua marina en regiones costeras.
- Vertidos urbanos e industriales
- Rocas de origen marino, por lo general presentan escasa proporción de cloruros. Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas.
- Más raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas.

Ión sulfato.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Procede de:

- Lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino
- Oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias.
- Disolución del yeso, anhidrita y terrenos yesíferos.
- Concentraciones en el suelo.
- Las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas pueden aportar cantidades importantes.

Ión nitrato.

Procede de:

- El origen de los nitratos en las aguas subterráneas no siempre es claro. Son relativamente estables pero pueden ser fijados por el terreno o ser reducidos a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. A menudo son indicadores de contaminación alcanzando entonces elevadas concentraciones y presentando, por regla general, una estratificación clara con predominio de las concentraciones más elevadas en la parte superior de los acuíferos libres.
- Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente, bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede los 10 ppm.
- Procesos de nitrificación naturales.
- Descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.

Ión sodio.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Procede de:

- Lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen.
- Localmente de la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (sales evaporitas).
- Raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos.
- El sodio es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl.
- Una fuente importante de sodio la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar.

- La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 ó 150 mg/l en aguas dulces normales.
- Es muy soluble y es el catión más abundante en el agua de mar.

Ión potasio.

Procede de:

- De la meteorización de los feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita (KCl $MgCl_2$).
- En agua subterránea no suele pasar los 10 ppm, a excepción de alguna salmuera.
- En ocasiones, más altas concentraciones pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.
- Tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico.

Ión magnesio.

Procede de:

- De la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnésianos, así como de agua marina.
- Localmente del lavado de rocas evaporitas magnésicas (carnalita, kaiserita, etc.).
- Aunque se disuelve más lentamente es más soluble que el calcio y tiende a permanecer en solución cuando éste se precipita.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Ión calcio.

Procede de:

- Suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos (calcita, aragonito y dolomita).
- Disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, concentración del agua lluvia.
- Ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos.

6.7.1 pH.

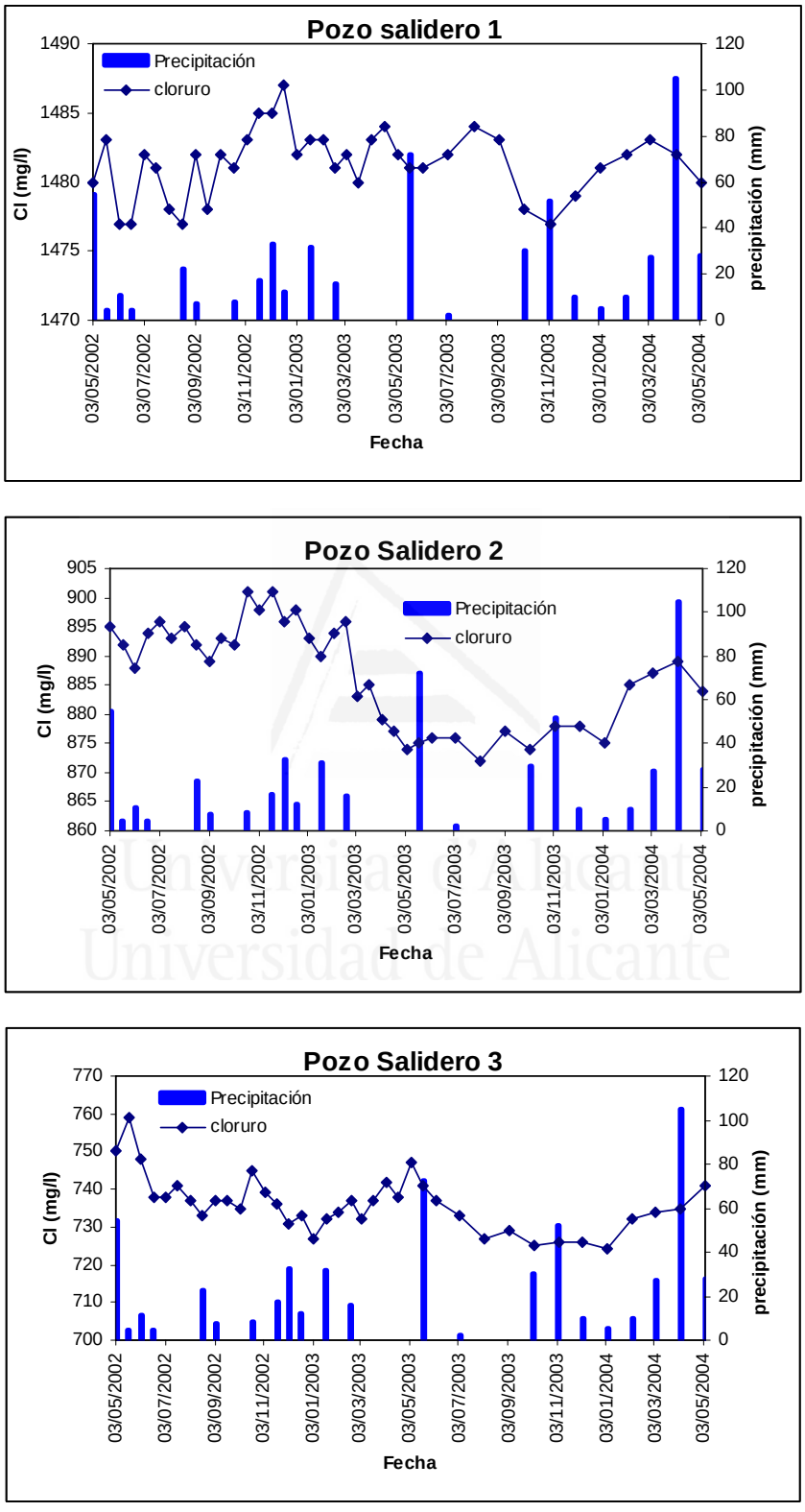
Las muestras de aguas de la batería de pozos construida en el sistema dunar se caracteriza por presentar un pH muy uniforme con un valor medio de 7,42 y una desviación típica de 0,23. Al comparar las medidas de pH durante todo el periodo de muestreo en cada pozo se observa que éste prácticamente se mantiene igual en el tiempo a pesar de que existen algunas variaciones en la composición química de las muestras sobre todo en los pozos vivero y fonteta.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

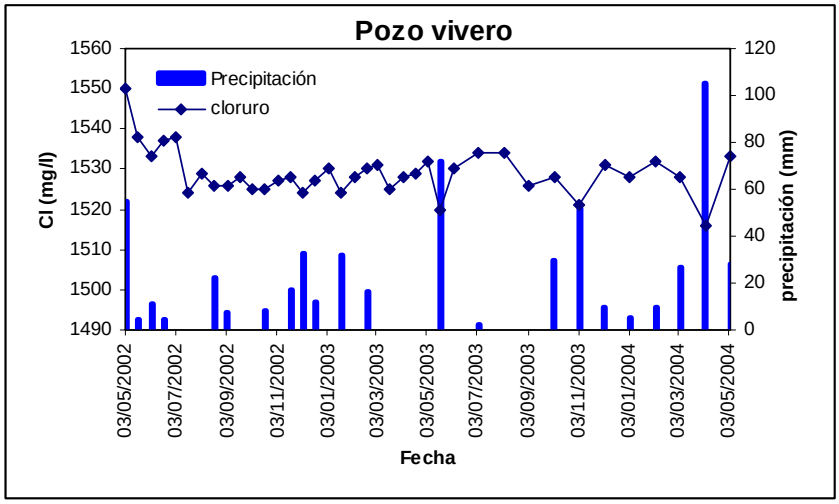
6.7.2 Cloruro

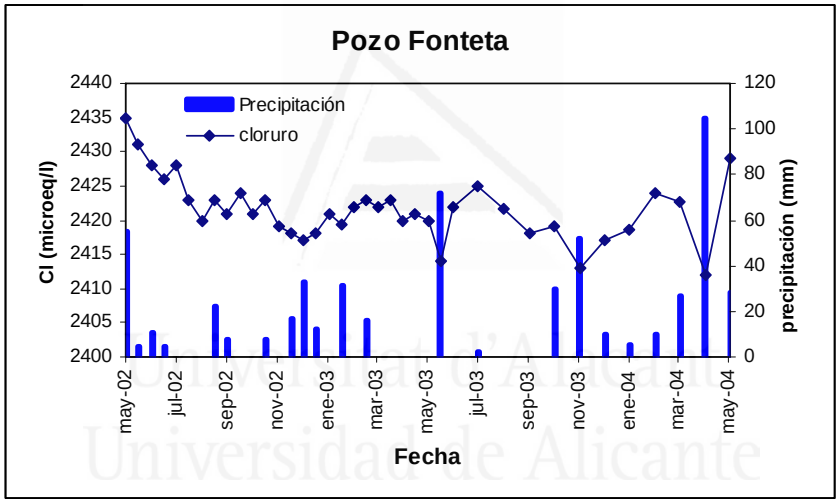
En la figura 62 se representa para el perfil vivero- fonteta la evolución del cloruro, en ésta se observa visiblemente la coincidencia en la disminución de las concentraciones cuando ocurren eventos de precipitación mensuales superiores a 50 mm. No obstante en los pozos salidero 1, salidero 2 y salidero 3, ubicados en un perfil al sur de Guardamar del Segura con profundidades que oscilaban entre 4 y 9 metros, se aprecia que no existen variaciones aún cuando se registraron precipitaciones mensuales de 105 mm. Las concentraciones más altas de cloruro se han dado en épocas con pocas precipitaciones e incluso en ausencia de ésta. Los contenidos más bajos de cloruros se han registrado a lo largo de todo el periodo de muestreo en los pozos salidero 2 y salidero 3 y los valores más elevados en los pozos fonteta, vivero y salidero 1. Es de anotar que la evolución en las concentraciones ha sido muy diferente en cada pozo.

Figura 62. Evolución de las concentraciones del cloruro y la precipitación en los pozos Vivero y Fonteta.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En la figura 63 se percibe un claro aumento de los nitratos en el pozo ubicado mas al interior del ecosistema (fonteta), es decir el que tiene más influencia del Segura, probablemente este mayor valor debido a la actividad agrícola de la vega media y baja del Segura sobre las aguas subterráneas. Rodríguez (2003) apunta que este elevado contenido es debido al exceso de fertilizantes utilizados en la producción de cultivos de regadío.

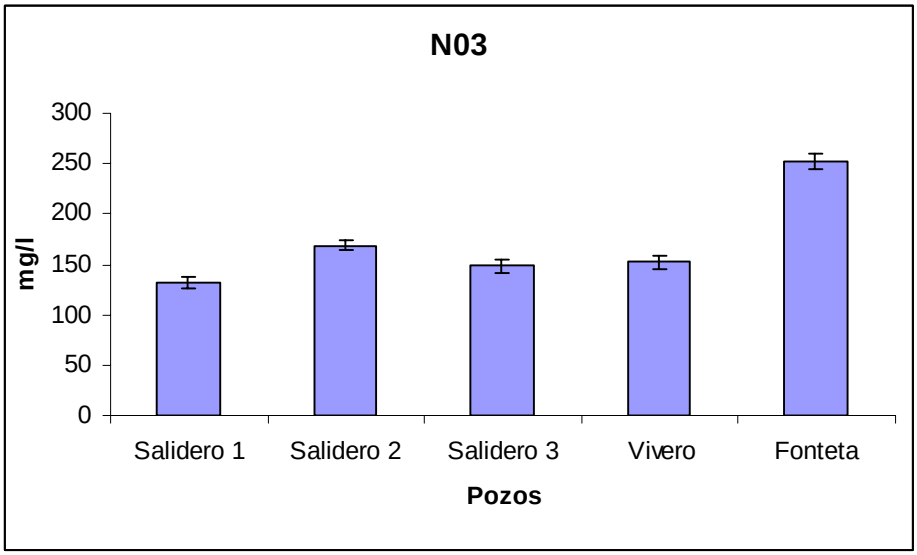


Figura 63. Comportamiento de las concentraciones de los nitratos en los cada uno de los pozos del ecosistema dunar.

Las relaciones iónicas en muchos casos permiten comprender las reacciones físico-químicas que afectan las aguas subterráneas y tienen directa relación con los materiales por donde circula el agua y/o fenómenos modificadores que cambian su composición (Herrera, 2001).

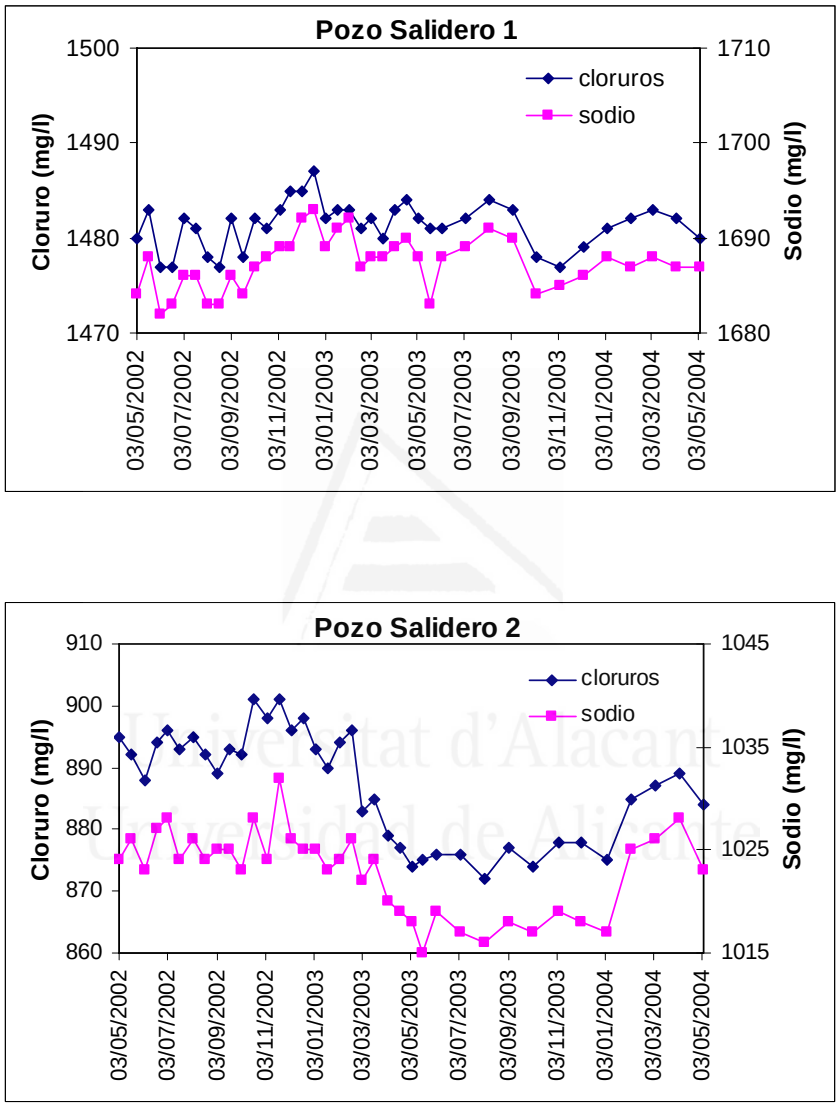
6.7.3 Relación rNa^+/rCl^-

El interés por esta relación está asociado a intercambio de bases, ya que el cloruro no se ve afectado por retenciones en el terreno, sin embargo el sodio se puede intercambiar con el calcio presente en algunos minerales del suelo. El valor de esta relación también puede ser alterado por la meteorización de los silicatos que en ocasiones liberan sodio en las aguas subterráneas.

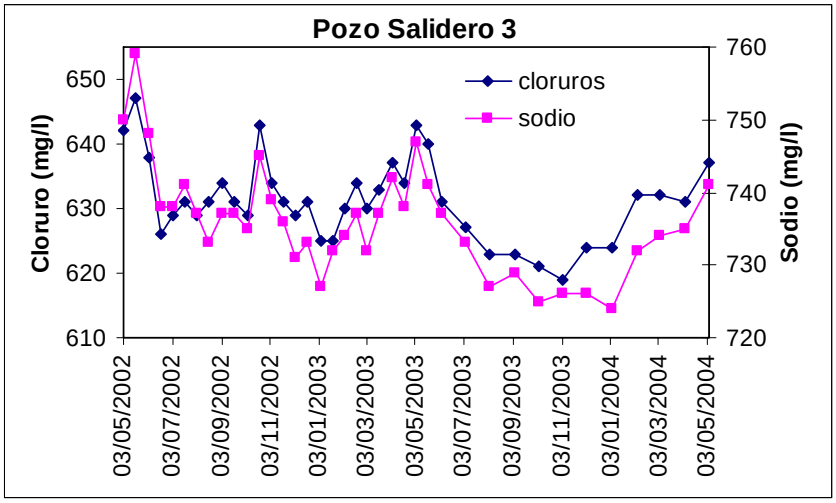
En la mayoría de pozos estudiados los iones cloruro y sodio está bien correlacionado como se aprecia en la figura 64, esta relación es muy clara sobre todo en los pozos (vivero-salidero 1) más cercanos a la línea de costa, esto hace pensar que exista un aporte externo y ajeno a la precipitación ya sea por litológica y/o marina, aún existiendo variaciones en periodos muy puntuales. Ruiz *et al*., 1989 señalan que este comportamiento obedece al fenómeno de la intrusión marina cada vez más agudo en zonas costeras. En todos los pozos se ha representado el cloruro frente al sodio de los

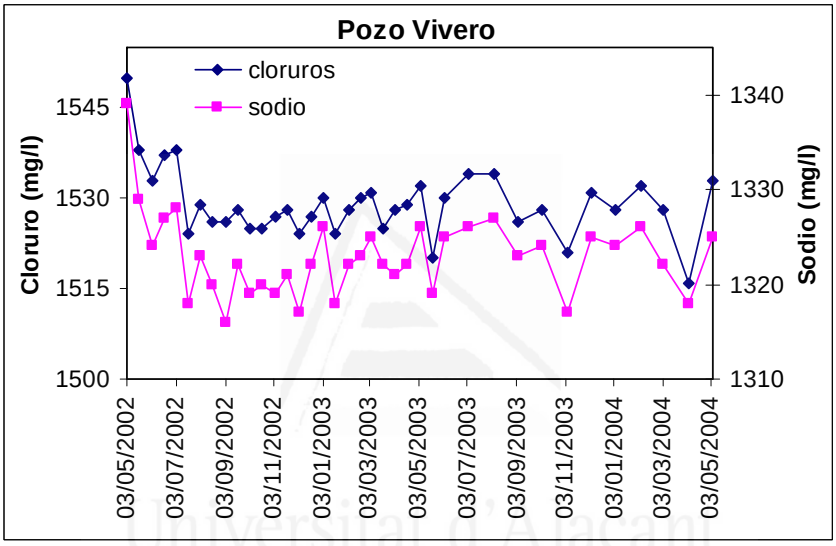
datos obtenidos en cada uno de ellos. Se puede apreciar de forma general que los puntos de mayor contenido de cloruro tienen mayor contenido de sodio.

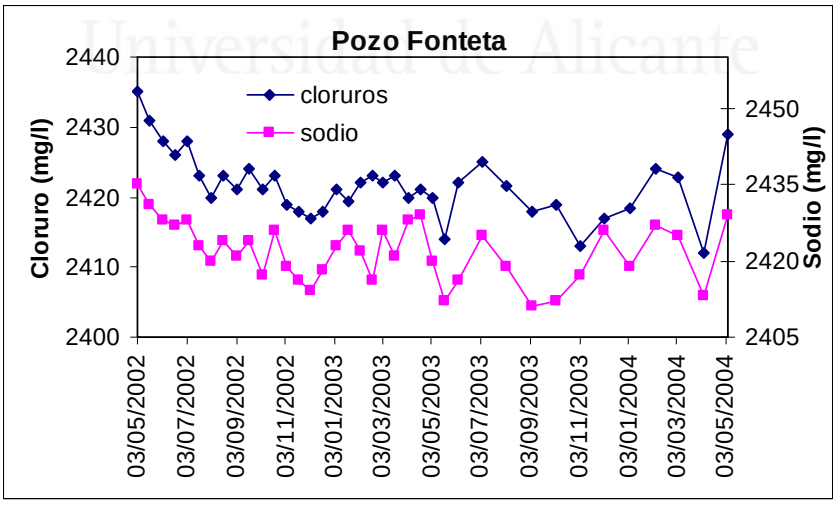
Figura 64. Evolución de las concentraciones de los iones cloruro y sodio en los pozos construidos en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



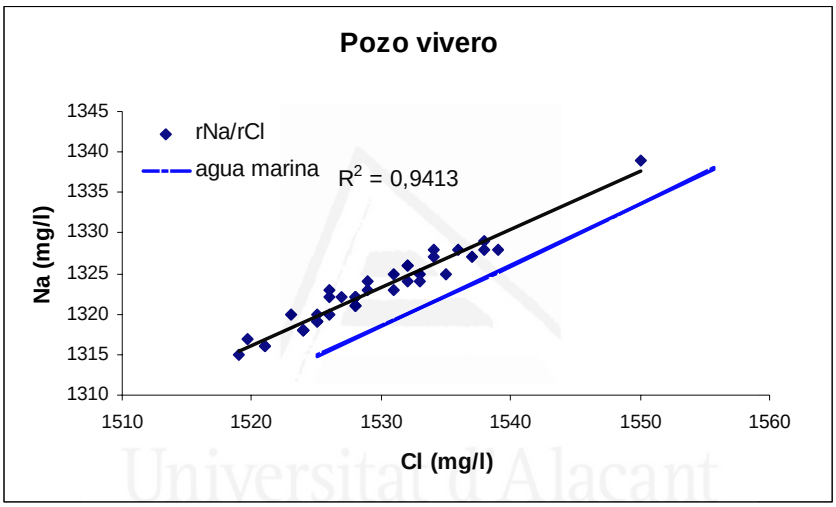


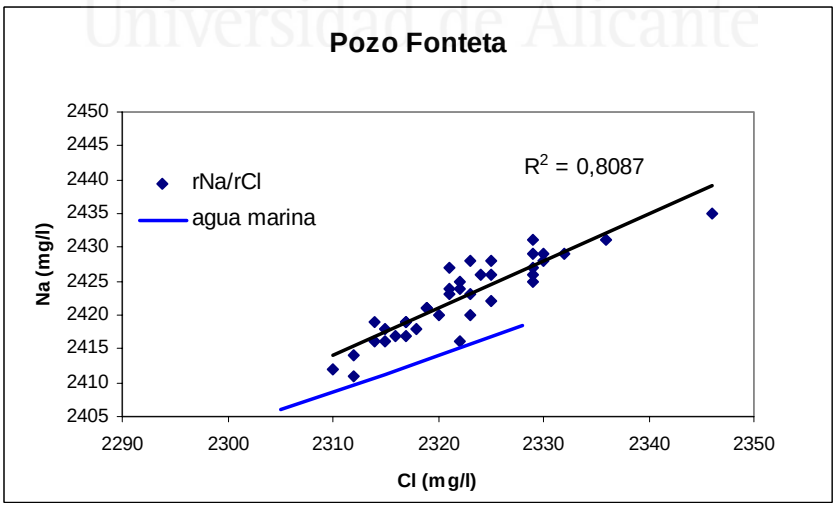


En el agua de mar esta relación tiene un valor de 0,837 (Custodio y Llamas, 1983), mientras que en el agua lluvia alcanza un valor de 0,86 (Bellot, 1988). En el agua subterránea del ecosistema dunar de Guardamar del Segura esta relación presenta

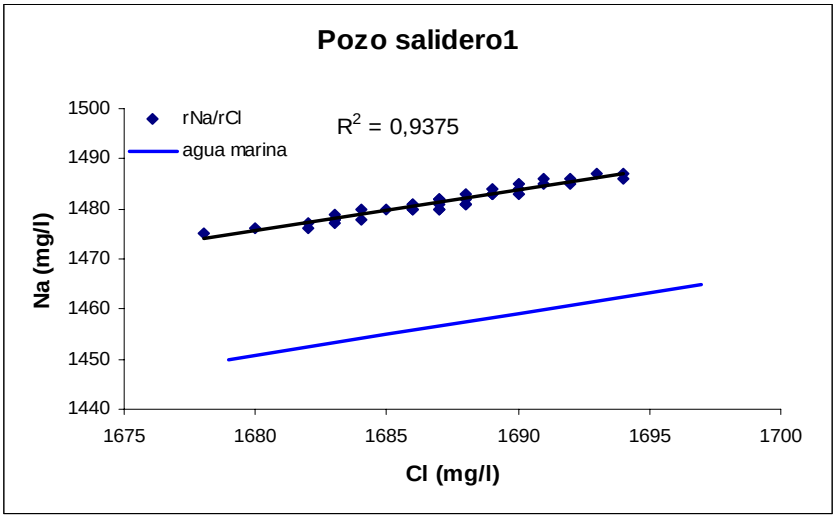
valores sensiblemente superiores a los de agua de mar como se aprecia en la figura 67. Los pozos ubicados cerca de la costa presentan una alta correlación (salidero 1, salidero 2 y vivero), sin embargo el pozo fonteta ubicado a 250 m de la rivera del Segura es el que presenta la más baja correlación. Estos paralelismos en los valores de estos iones investigados hacen pensar de la existencia de una cuña salina, que como argumenta Solis *et al*., 1988 en la Vega Baja se localiza una intrusión marina fósil relacionada con una transgresión del mar durante el Cuaternario, seguida de una regresión y afectada por Una Neotectónica.

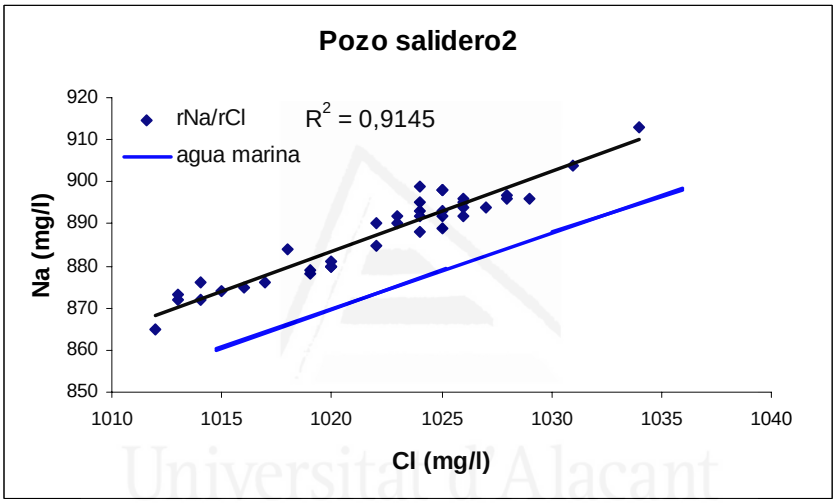
Figura 65. Relación iónica rNa/rCl del nivel freático de las dunas de Guardamar del Segura.



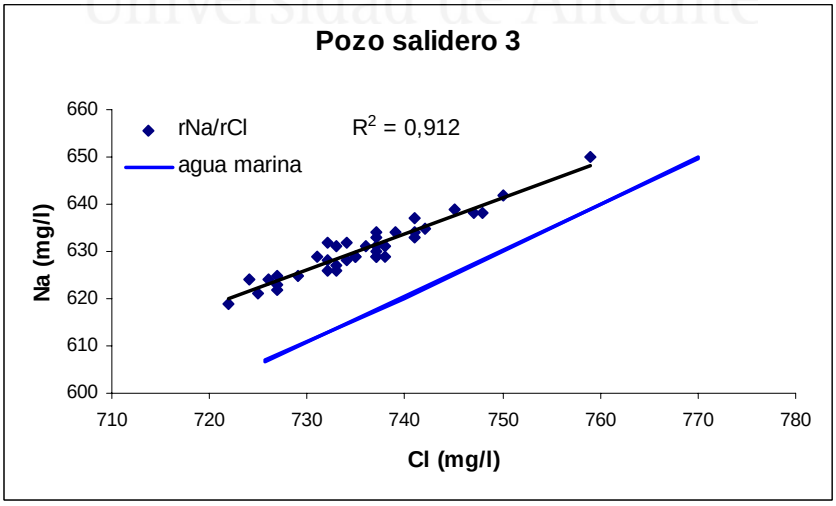


Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



6.7.4 Sulfatos

El sulfato presentó variaciones con los niveles freáticos en cada uno de los pozos, acentuándose más en el pozo fonteta como se aprecia en la figura 66. la distribución espacial mostró que existe un enriquecimiento de los pozos más alejados del mar mediterráneo. La concentración de este ión aumentó cuando se registraron precipitaciones mensuales superiores a 50 mm, la posible causa de este incremento en las concentraciones puede deberse al arrastre de fertilizantes de cultivos situados en la vega baja del río Segura. La concentración media del sulfato para este pozo ha sido de 309 mg/l, siendo por lo tanto el que presento los mayores valores de toda la batería de sondeos realizados en el ecosistema.

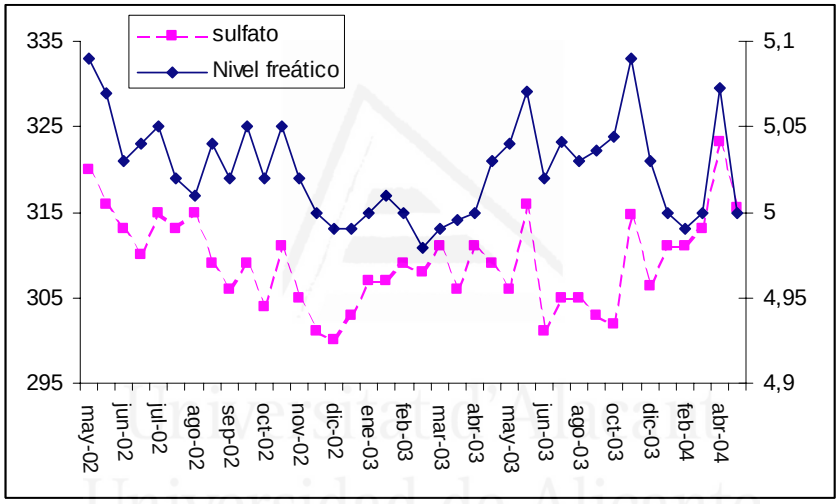


Figura 66. Evolución de la concentración del ión sulfato y del nivel freático con el tiempo para el pozo fonteta.

6.8 CONCLUSIONES

- El nivel freático en el pozo de menor cota, ubicado cerca del mar se encontró 1,95 m de profundidad y en aquel más retirado y situado a una cota mayor se localizó a 8,60 m.

- Existen cuatro capas bien representadas en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura: una capa representada por el suelo vegetal y arenas muy secas con unos espesores entre 0.75 a 1.18 m y una segunda capa que se asocia a arenas parcialmente saturadas de agua con espesores de 0.75 a 1.46 m, la tercera capa

representada por arenas secas con espesores que oscilan entre 4.25 a 23.7 m y una cuarta capa caracterizada por arenas saturadas de agua salada o la intrusión marina.

- Los iones cloruro y sodio muestra altas correlaciones en los pozos vivero y salidero 1 esto debido a la influencia o el avance de la intrusión marina al ecosistema.

- Existe un claro aumento del ion nitrato hacia el interior del ecosistema como lo reflejan los valores del pozo fonteta, la posible causa de ese incremento obedece a la influencia que tienen las aguas del río Segura en la hidrogeoquímica.

- Con precipitaciones mensuales de 70 mm se observo variaciones en el nivel freático en los pozos vivero y fonteta, fluctuaciones que pueden tener sus orígenes en: el incremento del caudal del río Segura en el caso del sondeo ubicado en la fonteta, la poca profundidad a la que se encuentra el nivel freático en el caso del pozo vivero y por ultimo las características geológicas de la zona de estudio.

- La salinidad del nivel freático del ecosistema dunar de Guardamar del Segura obedece a la intrusión marina, como lo demuestra las relaciones hechas con algunos iones, así mismo los resultados reflejados en los sondeos eléctricos verticales.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO VII
VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE GEORRADAR PARA EL ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.1 INTRODUCCIÓN

El radar de penetración en tierra (GPR) es un método basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. Estas discontinuidades son cambios de los parámetros del subsuelo, es decir la conductividad, la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética. Los registros son similares a los obtenidos en estudios de sísmica de reflexión con la diferencia que el GPR trabaja con frecuencias mucho más altas y la emisión de pulsos se puede realizar muy rápidamente. La información de las medidas hechas se obtiene los llamados radargramas la cual es muy variada, pero principalmente se trabaja con tiempos de llegada. Las profundidades de muestreo dependen de las características del equipo y del medio a analizar.

Se trata, por tanto de una técnica no destructiva que utiliza ondas electromagnéticas para determinar superficies reflectoras en el interior de un medio a estudiar. El equipo básicamente consta de una unidad de control central, una o varias antenas conectadas a ella y un sistema de grabación o de impresión de datos. La unidad de control funciona gracias a un software que controla la emisión y recepción de la energía.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Aunque esta técnica es relativamente nueva, han sido las décadas posteriores a los años 70 las más fecundas en cuanto a la diversidad de aplicaciones, desarrollo del método, tratamiento de datos y fabricación de equipos, cuando Unterberger, 1974; Annan y Davis, 1976; Rubin y Fowler, 1977 lo utilizan en investigaciones geológicas y de minería. Después de los años 80 se utiliza para hacer análisis de pavimentos y materiales de construcción (hormigón) llevadas a cabo por Halabe, 1990; Chung *et al*., 1994; Saarenketo *et al*., 1998; Olhoeft, 2000; Lorenzo *et al*, 2001. Otra línea de investigación desarrollada fue la de arqueología en ella se destacan los trabajos realizados por Goodman, 1994; Carcione, 1996; Pérez-Gracia *et al*, 2000; Da Silva *et al*., 2001; Lorenzo *et al*. 2002

En los últimos años es posible encontrar las primeras aplicaciones del GPR en estudios de agricultura y silvicultura. Hruska *et al*., (1999) estudia la distribución del sistema radicular de árboles de roble. Ermak *et al*., (2000) estudia el crecimiento de las raíces en áreas urbanas y en suelos arcillosos. Butnor *et al*., 2001 extiende el trabajo iniciado por

Hruska *et al.,* (1999) explorando la habilidad del GPR para delinear raíces en diferentes tipos de suelo y clasificando las raíces por diámetro. Nakashima *et al*., 2001 aplica este método para estimar en nivel freático. Wielopolski *et al*., 2002 propone un procedimiento no invasivo en el estudio de raíces con antena de 1,5 Ghz.

Por lo tanto el desarrollo que ha adquirido esta técnica en los últimos años ha ampliado los campos de aplicación abriendo las puertas a nuevas investigaciones y posibilidades. Debido al gran interés en estudios superficiales altamente resolutivos del subsuelo este desarrollo se está realizando muy rápidamente. Los numerosos aportes de este método en distintas disciplinas se constituyen por tanto en un espectacular avance. Son muchos los ejemplos de estas contribuciones que van desde estudios de casos concretos, pasando por ensayos experimentales y desarrollo de software y de equipos. En esta tesis presentamos otra de las aplicaciones que podría tener el GPR en las investigaciones de ecosistemas dunares, en el caso especifico desarrollar una metodología para el estudio del sistema radicular de dos especies arbóreas.

Estudiar el sistema radicular de un árbol por métodos tradicionales implica normalmente remover cantidades considerables de suelo, además del tamizado, lavado, secado y pesado, por lo tanto son métodos destructivos y bastante laboriosos. Estudiar las raíces de un bosque es esencial para conocer la productividad, fijación de carbono, profundidad de captación de agua, etc.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Por lo tanto pretendemos en esta investigación validar por una parte esta técnica y por otra describir paso a paso el desarrollo metodológico realizado en el estudio del sistema radicular de especies arbóreas dominantes en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

7.2 OBJETIVOS.

7.2.1 General.

El objetivo general de esta investigación fue validar el método del GPR para el estudio del sistema radicular de las dos especies arbóreas del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

7.2.2 Específicos.

- Diseñar una metodología con GPR para el estudio del sistema radicular de pinos en un sistema dunar.

- Determinar la frecuencia de la longitud de onda idónea para el estudio de las raíces en el sistema dunar de Guardamar del Segura.

- Valorar diferentes tipos de antenas monoestáticas en el estudio radicular de los pinos del ecosistema dunar.

- Determinar el menor diámetro de raíces detectadas por el GPR en *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L en este tipo de ambientes.

- Conocer la distribución del sistema radicular de los pinos del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

7.3 FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN CON GPR

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.3.1 Propagación de ondas electromagnéticas.

Para conocer la operatividad del GPR es necesario analizar, al menos en sus aspectos básicos, los conceptos físicos que sirven de base para el funcionamiento de este dispositivo.

En esta parte desarrollaremos las bases teóricas sobre las que se asientan los fenómenos de propagación, transmisión y reflexión de las ondas electromagnéticas.

Se utilizan las leyes de Maxwell como punto de partida para obtención de las ecuaciones que rigen la propagación de ondas electromagnéticas, definiendo su dependencia con los parámetros electromagnéticos del medio de propagación.
La expresión de la 3ª y 4ª leyes de Maxwell en forma vectorial es la siguiente:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \varepsilon \ \mu \ \vec{J} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Donde:

E: intensidad de campo eléctrico (V/m).

B: intensidad de campo magnético (T)

J: densidad de corriente (A/m^2)

ε **y** μ : Permitividad eléctrica y permeabilidad magnética del medio

Ecuaciones que relacionan la variación de las magnitudes de campo eléctrico y magnético con el tiempo, en un punto cualquiera del espacio.

Estas ecuaciones también ligan los campos eléctrico y magnético con las fuentes que los producen, a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio determinado. Estas constantes definen electromagnéticamente el medio. En prospección con radar de subsuelo tres de estos parámetros son básicos para comprender qué se está registrando. Se trata de la conductividad, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética, siendo:

$\sigma = E/J$ (1.3)

$\varepsilon = E/D$ (1.4) D: densidad de flujo eléctrico (C/m^2)

$\mu = H/B$ (1.5) H: intensidad de campo magnético aplicado (Wb/m^2)

Siendo σ, ε y μ constante para cada material independientes de los campos, tal y como se indica a continuación:

σ: Conductividad eléctrica del material ($\Omega^{-1}m^{-1}$)

$\varepsilon = \varepsilon_r \ . \ \varepsilon_0$: constante dieléctrica del material (F/m)

ε_r : constante dieléctrica relativa.

ε_0 =10^{-9}/(36π) F/m, constante dieléctrica en el vacío.

$\mu=\mu_r . \mu_0$: permeabilidad magnética del material (H/m)

μ_r: permeabilidad magnética relativa.

$\mu_0=4\pi/10^7$ H/m, permeabilidad magnética en el vacío.

Las ondas planas son una buena aproximación a las ondas reales en la mayoría de las situaciones prácticas. Las ondas de radio, a una distancia suficiente de la antena transmisora o de superficies reflectoras, pueden ser consideras como ondas planas, ya que su radio de curvatura es muy grande. Muchos de los conceptos aplicados a óptica pueden ser trasladados cuando se trabaja con ondas planas.

La mayoría de las ondas electromagnéticas pueden ser consideradas como la superposición de un conjunto de ondas planas, de modo tal que el conocimiento del comportamiento de las ondas planas, ayuda a resolver los problemas planteados al tratar ondas más complejas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Dos ecuaciones rigen el fenomeno de propagacion de ondas electromagneticas en un medio homogeneo e isotrópico.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - \gamma^2 E_y = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} - \gamma^2 H_y = 0$$

Una solución para la onda incidente de campo eléctrico resulta ser entonces:

$$E_y = E_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma x}$$

Donde $\omega=2\pi f$, siendo f la frecuencia de la onda y γ la constante de propagación, que se define como:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon}$$

La constante de propagación también se puede escribir de la siguiente forma:

$\gamma = \alpha + j\beta$, donde *j* es el número complejo.

Siendo α la *constante de atenuación* y β la *constante de fase*.

Donde : $$\alpha = \mathrm{Re}\left\{\sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon}\right\} = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1+\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}} - 1\right]}$$

$$\beta = \mathrm{Im}\left\{\sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon}\right\} = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1+\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}} + 1\right]}$$

La velocidad *v* y la longitud de la onda de la señal λ se expresan con las siguientes ecuaciones:

$$v = \frac{\omega}{\beta}$$

$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ Verificando entre las dos relaciones precedentes:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.3.2 Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas.

Si se suponen dos medios a través de los cuales se propaga una onda electromagnética plana, en una dirección que forma un ángulo θ_i con la normal a la superficie de separación de ambos medios (figura 67), al incidir el campo en esta superficie parte de la energía que posee penetra en el segundo medio y parte se refleja volviendo al medio inicial.

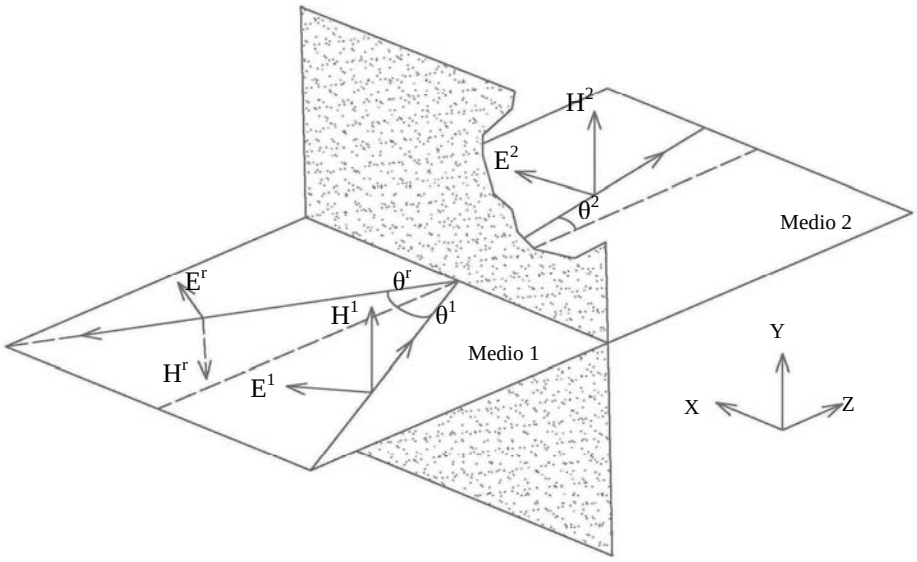


Figura 67. Reflexión y transmisión de una onda electromagnética polarizada con su vector E contenido en el plano incidente.

La relación entre las variables que se definen el campo incidente y las de los campos reflejado y transmitido depende no solamente del contraste de propiedades electromagnéticas entre ambos medios, sino también de los ángulos de incidencia, reflexión y transmisión.

Para ello se comienza estudiando la relación entre las amplitudes de los campos eléctricos incidente, reflejado y transmitido, generalizando posteriormente los conceptos de reflexión y transmisión en un marco de intercambio de energía entre ambos medios.

Suponiendo el vector del campo eléctrico de la onda incidente E^i contenido en el plano de incidencia, tal y como se verifica en los campos generado por las antenas del GPR, y considerando un tríodo de referencia (x,y,z) tal como se indica en la figura 68, donde los ejes ``x`` y ``z``están contenidos en dicho plano, teniendo el eje ´´z´´ como sentido positivo hacia el interior del segundo medio, y el eje ``y`` coincide con su normal en la dirección del campo magnético incidente, es posible expresar los campos incidentes de la siguiente manera:

$$E^i = E_0^i \; e^{-\gamma\left(x\,sen\theta_i + z\cos\theta_i\right)} e^{j\omega t} \quad \text{con}$$

$$H^i = H_0^i \; e^{-\gamma\left(xen\theta_i + z\cos\theta_i\right)} e^{j\omega t}$$

$$E_0^i = E_0^i a_{Ei}$$

$$H_0^i = H_0^i a_y$$

Donde a_y, es el vector unitario en la dirección de eje ``y``, a_{Ei} es el vector unitario en la dirección del vector campo eléctrico incidente y E_0^i y H_0^i pueden ser complejos para incluir las diferencias de fase.

Análogamente, para el campo eléctrico y magnético reflejado las ecuaciones son:

$$E^r = E_0^r \; e^{-\gamma\left(xen\theta_r + z\cos\theta_r\right)} e^{j\omega t}$$

con $$H^r = H_0^r \; e^{-\gamma\left(xen\theta_r + z\cos\theta_r\right)} e^{j\omega t}$$

$$E_0^r = E_0^r a_{Er}$$

$$H_0^r = -H_0^r a_y$$

Donde a_{Er} es el vector unitario en la dirección del vector campo eléctrico reflejado y E_0^r y H_0^r pueden ser complejos para incluir las diferencias de fase.

Por ultimo, las expresiones de los campos eléctrico y magnético transmitidos son las siguientes:

$$E^t = E_0^t \; e^{-\gamma\left(xen\theta_t + z\cos\theta_t\right)} e^{j\omega t}$$

$$H^t = H_0^t \; e^{-\gamma\left(xen\theta_t + z\cos\theta_t\right)} e^{j\omega t}$$

$$E_0^t = E_0^t a_{Er}$$

$$H_0^t = H_0^t a_y$$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Siendo a_{Et} es el vector unitario en la dirección del vector campo eléctrico transmitido y E_0^t y H_0^t pueden ser complejos para incluir las diferencias de fase.

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales del medio. Este porcentaje nos define los coeficientes de transmisión y de reflexión de la energía.

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético, pudiendo definir una impedancia para el campo electromagnético incidente, η_1, que coincidirá con la del campo magnético reflejado, y otra para el campo electromagnético refractado, η_2, es decir, transmitido:

$$\eta_1 = \frac{E_0^i}{H_0^i} = \frac{E_0^r}{H_0^r}, \quad \eta_2 = \frac{E_0^t}{H_0^t}$$

Por otra parte, de las condiciones de continuidad de las componentes tangenciales de E y H en cualquier instante de tiempo y punto de la superficie de separación se deducen las siguientes relaciones de Fresnel, que relacionan la intensidad del campo eléctrico incidente con las de los campos reflejado y transmitido según: (teniendo cuenta que $\theta_i = \theta_r$)

$$ref = \frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{\eta_2 \cos\theta_t - \eta_1 \cos\theta_i}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t}$$

$$tra = \frac{E_0^t}{E_0^i} = \frac{2\eta_2 \cos\theta_i}{\eta_1 \cos\theta_i + \eta_2 \cos\theta_t}$$

Estando θ_t expresado en función de θ_i de acuerdo con la ley de Snell que relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto ($\frac{sen\theta_t}{sen\theta_i} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2}$).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Las anterior expresiones se conoce a ``*ref*`` como coeficiente de reflexión de la amplitud del campo eléctrico incidente y a ``*tra*`` como coeficiente de transmisión de dicha amplitud.

A partir de dichas expresiones es inmediato calcular los coeficientes de reflexión y transmisión de la intensidad del campo magnético, bastando para esto expresar en ellas los campos eléctricos en función de los magnéticos a través de las impedancias η_1 y η_2.

En el caso de que se pueda suponer incidencia normal, las ecuaciones se simplifican ($\theta_i = 0 = \theta_t$) quedando únicamente en función de la relación entre impedancias de ambos medios:

$$ref = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2}$$

$$tra = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$$

7.4 PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS A TENER EN CUENTA EN LA INVESTIGACIÓN CON GPR.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La propagación de la señal emitida por el georadar depende de las propiedades del subsuelo (conductividad, permitividad eléctrica, y permeabilidad magnética). La conductividad eléctrica de suelos y rocas y la trayectoria que recorren estas ondas, limitan mediante pérdidas de energía la profundidad a la que estas ondas pueden viajar.

7.4.1 Conductividad.

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de las cargas libres de la presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Es decir proporciona una medida de

capacidad de un material de conducir corriente eléctrica según la ley de Omh. Alternativamente se trabaja también con la resistividad, inverso de la conductividad.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\Omega^{-1}m^{-1}) \text{ ó } (S/m)$$

En general podremos distinguir entre materiales conductores, semiconductores o aislantes. Pertenecen al primer grupo aquellos materiales cuya conductividad es mayor a 10^5 s/m, mientras que materiales que presentan una conductividad menor a 10^{-8} s/m se clasifican como aislantes, siendo los semiconductores aquellos cuya conductividad se encuentra entre estos dos valores.

En muchos medios sucede que el contenido de agua en los poros de las rocas y su composición química determinan su conductividad, más que los granos que la componen.

La temperatura afecta la movilidad de los iones, de forma que influye en la conductividad electrolítica. En general la conductividad es un parámetro fuertemente variable que no solo depende de los materiales del medio, ya que puede variar dentro de la misma formación. En materiales porosos este parámetro es fuertemente variable dependiendo de la naturaleza de los iones disueltos en el fluido intersticial, de la saturación de agua, del número de poros y de su comunicación entre otros factores.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.4.2 Permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica es una constante es una constante de proporcionalidad entre la entre la intensidad de campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico.

La permitividad dieléctrica puede definirse como la polarización eléctrica adquirida por una sustancia como consecuencia de la inducción generada por un campo electromagnético. La permitividad dieléctrica se expresa en faradios/m, pero generalmente se utiliza la permitividad dieléctrica relativa respecto a la del vacío, también denominada constante dieléctrica, que es adimensional.

La permitividad dieléctrica relativa de un suelo compuesto por tres componentes (aire, agua y partículas minerales) es igual a:

$$k = kw\alpha\ \theta + km\alpha\ (1-n) + ka\ \alpha\ (n-\theta)$$

Donde,
kw es la permitividad dieléctrica relativa del agua
ka es la permitividad dieléctrica del aire
km es la permitividad dieléctrica de las partículas minerales
n es la porosidad del suelo
θ es el contenido volumétrico en agua del suelo
α es un factor estructural, cuyo valor para suelos isótropos es 0,5

La permitividad dieléctrica relativa del agua es aproximadamente igual a 80, la de las partículas minerales constituyentes de suelo oscila entre 3 y 5, y la del aire es igual a 1. Por tanto, dado el elevado contraste entre kw y los demás componentes del suelo, el contenido en agua es el factor dominante del valor de esta propiedad en los suelos.

7.4.3 Permeabilidad magnética.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Este parámetro es el que relaciona la inducción magnética con la intensidad del acampo magnético. Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío y la permeabilidad relativa del material.

En la mayor parte de los materiales que nos encontramos con el GPR (excepto materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

7.4.4 Efecto de la humedad.

La constante dieléctrica de las rocas húmedas es mayor que cuando están secas, por causa de la elevada permitividad del agua.

Cuando el contenido de agua es muy pequeño, la relación entre este y la ε. de las rocas es lineal y para mayores contenidos, la constante tiende a un valor límite. Tarkhov ha encontrado para rocas sedimentarias muy porosas y contenidos en agua inferior al 1%, la relación:

$$\varepsilon' = \varepsilon \cdot w^n$$

Donde ε' es la constante dieléctrica para un contenido en agua *w*, ε . el valor correspondiente a la roca seca, y "n" un exponente próximo a 0.3.

Si el agua tiene salinidad apreciable el efecto será mayor, debido a la permitividad de los electrolitos.

Se debe también tener presente que el valor de la constante dieléctrica de las rocas y minerales puede depender de la presión y temperatura. En general, a mayor presión corresponde mayor permitividad, puesto que al aumentar la presión crece el número N de átomos por unidad de volumen. La temperatura influye poco en la constante dieléctrica.

Así pues, conocida la porosidad de la roca en concreto y la resistividad de las soluciones acuosas que rellenan sus poros, podría calcularse la resistividad de dicha roca. La porosidad en % de cada roca se presenta en la siguiente tabla:

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Roca	Porosidad %	Roca	Porosidad %
Arcillas	20-50	Cienos	80-85
Arenas gruesas	25-60	Dolomías	3-20
Arenas finas	30-40	Gravas	20-40
Arenas de medanos	40	Lavas	20-80
Arena de playa	80-85	Margas	4-60
Areniscas	20-35	Rocas ígneas	0,35
Calizas	1,5-20	Vulcanitas clásticas	5-60

Tabla 32. Porosidad para algunos tipos de roca.

Los valores de las magnitudes eléctricas descritas para los tipos de rocas van a estar en función de una serie de parámetros, y estos son los siguientes:

- Composición y relación volumétrica de cada uno de sus componentes.

- Distribución volumétrica de las componentes en el interior de las rocas, formaciones minerales y sustancias.

- Interacciones entre las diferentes fases.

- Intervalo de frecuencias empleadas en la emisión de ondas electromagnéticas al medio en los trabajos, estudios e investigaciones.

- Composición del fluido y del volumen de dicho fluido en las oquedades, que contengan las litologías saturadas, así como de la distribución de estos fluidos en las oquedades.

- Condiciones térmicas y de presión que tuvieron lugar durante su formación y que están actuando en ellas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

7.5 METODOS DE OBTENCIÓN DE DATOS CON GPR.

Con las antenas monoestáticas pueden efectuarse tres tipos de adquisición de datos, dos de ellas sobre superficie y la tercera en pozos de sondeo. Las adquisiciones de datos en superficie pueden ser mediante perfiles o puntuales.

Cada método debe seleccionarse en función del problema que se debe estudiar y de los resultados que se desean.

7.5.1 Adquisición en perfiles.

Para efectuar un perfil se desplaza la antena en nuestro caso la monoestática a lo largo de una línea. Durante el desplazamiento se emiten un elevado número de pulsos por segundo. Se pueden emitir desde 1 pulso hasta 100 cada segundo. Esto permite que la

adquisición de datos, aunque sea en realidad puntual se pueda considerar continua por la cantidad de trazas a lo largo de todo el perfil, dependiendo siempre de la velocidad de desplazamiento de la antena. Esta velocidad debe realizarse lo más constante posible.

7.5.2 Adquisición puntual.

La adquisición de datos de forma puntual se realiza situando la antena en un punto dado del área de estudio. En dicho punto y sin efectuar ningún desplazamiento se realiza la emisión de energía y la adquisición de datos. De esta forma tenemos información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se ha ubicado la antena. Esta forma de adquisición de datos se suele realizar cuando el terreno impide otro tipo de prospección que implique desplazamiento de las antenas (por ejemplo en el caso de glaciares o en zonas donde la existencia de obstáculos impide o dificulta el desplazamiento uniforme de las antenas).

7.6 PRINCIPIOS DEL RADARGRAMA.

La energía de reflexión y de refracción de la onda electromagnética esta determinada por los cambios de las características electromagnéticas del medio. La interfaz se puede originar por diversas capas del suelo o por los objetos enterrados que tienen constantes dieléctricas diferentes.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El GPR emite un pulso electromagnético hacia el subsuelo y espera la reflexión de este último (Figura 68). Si el pulso emitido se encuentra con un cambio de características electromagnéticas del suelo o la presencia de un objeto enterrado, se detecta en el receptor un pulso reflejado.

La distancia se determina a partir de la diferencia del tiempo entre el comienzo del pulso transmitido y el comienzo del pulso reflejado. En este tiempo la onda recorre dos veces la distancia entre el objeto y la antena receptora del GPR. La distancia del objeto enterrado.

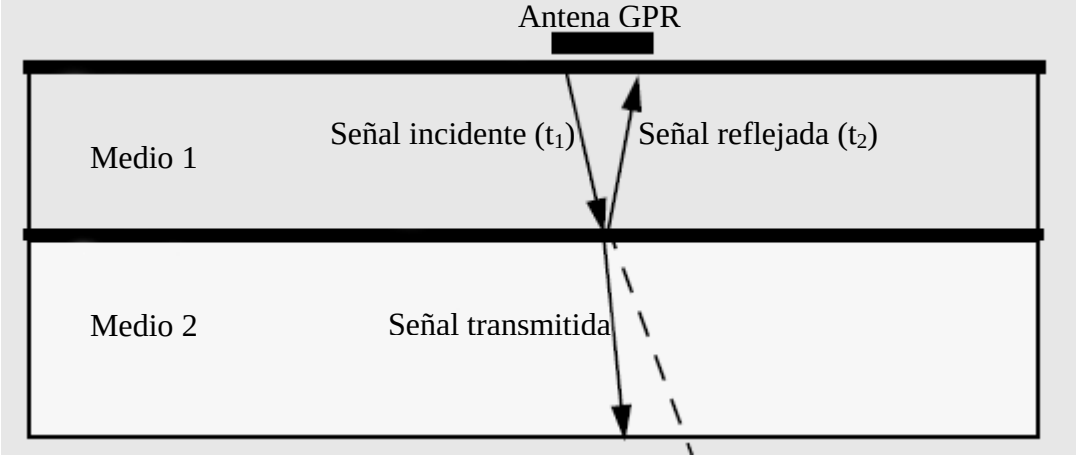


Figura 68. Señales GPR incidente, reflejada y sus tiempos de viaje entre la emisión y la recepción de la onda reflejada ($t_1 + t_2$).

La figura 69 representa un ejemplo de una señal registrada en un GPR. Inicialmente registramos el pulso directo, ya que la antena está en recepción antes de que se emita el pulso. Seguidamente se registran diferentes reflexiones de la onda: aire-suelo, y cambios de impedancia en el subsuelo.

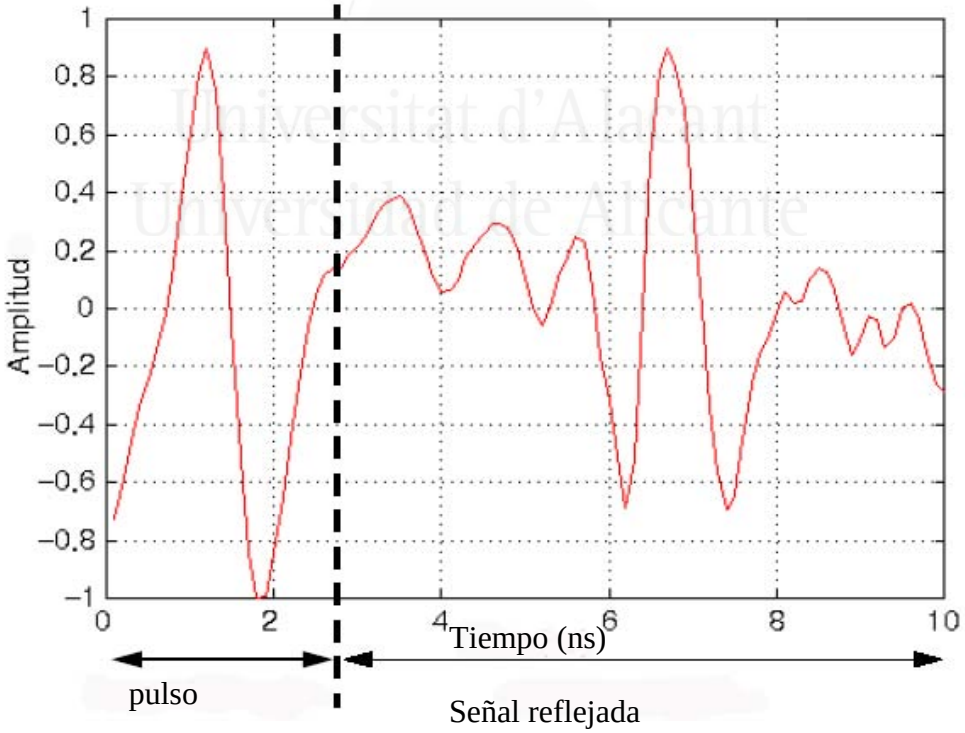


Figura 69. Ejemplo de registro GPR que consiste en las señales emitidas y las señales reflejadas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Otro punto interesante para entender los radargramas, es como se forman las hipérbolas. Podemos ver un ejemplo simple de formación de una hipérbola en la detección de un tubo. En la figura 70 se presenta la imagen que resulta en el radargrama cuando se detecta un tubo.

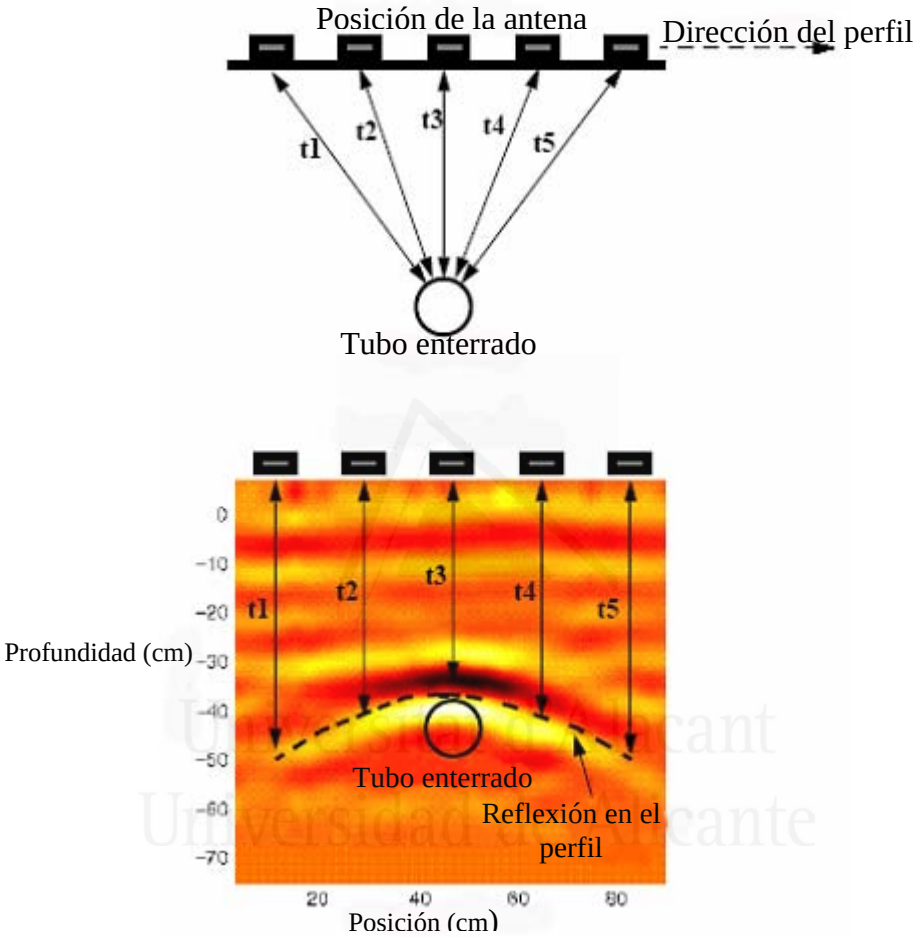
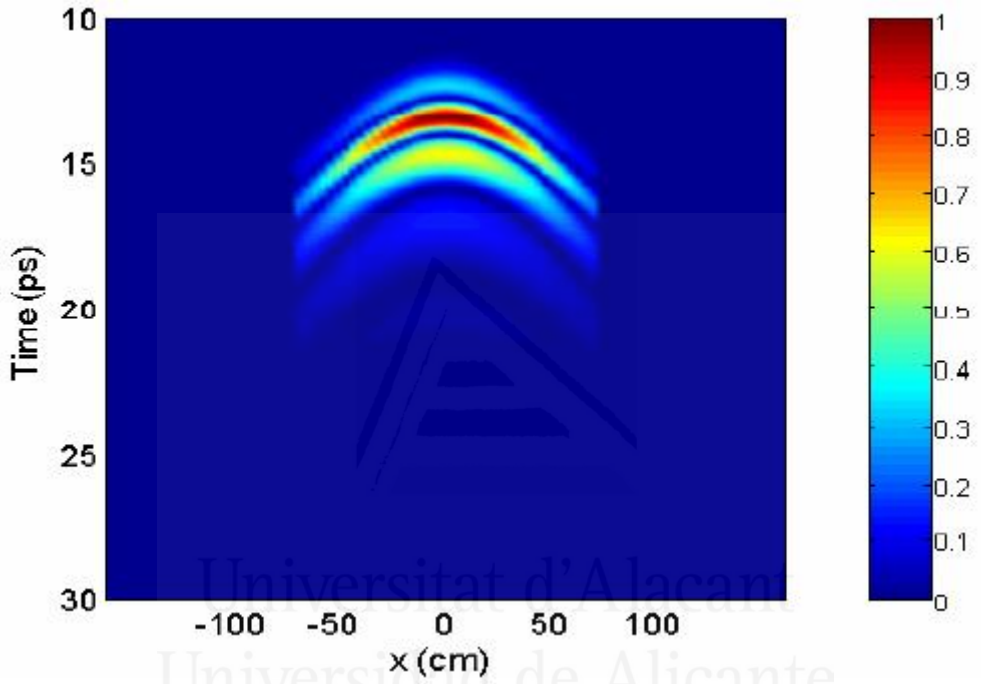


Figura 70. Ejemplo de detección de un tubo enterrado

La antena del GPR empieza a tener reflexiones del tubo antes de llegar a su ubicación (momento en que la antena y el tubo se encuentran en la línea vertical), y continúa recibiendo reflexiones después de alejarse de este ultimo. Esto nos da la forma de hipérbola que aparece en el radargrama.

Este efecto se produce porque, en la práctica, la antena tiene un haz principal dirigido y otros secundarios, que nos permiten obtener reflexiones antes llegar al objeto enterrado y después de alejarnos de él.

En el caso ideal de un medio homogéneo infinito en el que existe un único objeto aislado a detectar, al hacer un barrido a lo largo de una línea y representar las distintas trazas se obtiene en el diagrama tiempo-espacio, una hipérbola como la mostrada en la Figura 71. Esta hipérbola está relacionada con el tiempo de retardo con que la señal reflejada por dicho objeto llega a la antena receptora en las distintas posiciones que esta ocupa a lo largo del barrido. Este tiempo es mínimo en el punto donde la antena receptora está más cerca del blanco, lo que corresponde al máximo de la hipérbola.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 71. Representación ideal de una hipérbola que representa un objeto en un medio homogéneo ideal.

7.7 COMPONENTES DE UN EQUIPO GPR.

El GPR es un sistema que en la forma más básica, necesita una antena emisora y otra receptora, y una unidad de control que sirve para coordinar el funcionamiento del resto de sus componentes, principalmente para la emisión y la recepción de los impulsos electromagnéticos. Además, es necesario un ordenador portátil como unidad de almacenamiento de los datos registrados y de visualización de los mismos (figura 72).

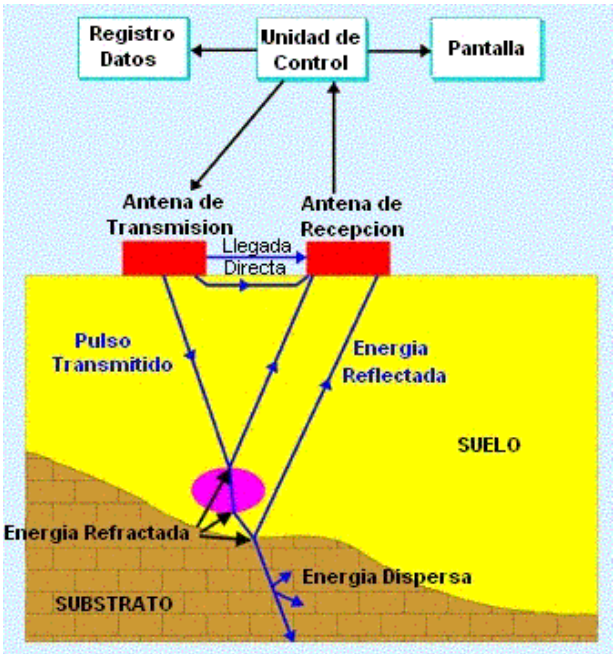


Figura 72. Esquema de funcionamiento de un GPR con antena monoestática.

7.7.1 Unidad central.

Esta unidad de control opera con el software informático GPR.exe, para controlar los tiempos de envío de señales eléctricas que la antena las convierte en electromagnéticas y recibir las señales reflejadas en forma de radargramas. Esta misma se alimenta con baterías movibles par tener autonomía y movilidad en el campo (Figura 73).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 73. Unidad de control GPR

Su función principal consiste, en primer lugar, en coordinar entre la emisión y la recepción de las ondas electromagnéticas a través las antenas. Esta función se realiza mediante un reloj interno que controla la frecuencia de los impulsos, que puede ser del orden de 50 KHz por lo tanto, cada 2 10^{-5} s el radar emite un impulso que dura entre 1 y 10 ns (10^{-9} y 10 10^{-9}s), por lo que se puede decir que está exclusivamente casi todo su tiempo parado, a la espera de poder detectar las reflexiones del subsuelo, cuyo retraso es directamente proporcional a la profundidad del reflector.

En cambio el proceso de recepción de señales es algo más complejo, ya que los circuitos electrónicos receptores no son suficientemente rápidos como para poder registrar, en unos cuantos ns, la historia de las reflexiones. De esta forma es necesario, para reconstruir la señal, recurrir a una técnica de muestreo utilizando la información que se recibe cada 1/50000 segundos.

El número de impulsos empleados para la reconstrucción de la señal se decide desde el programa de adquisición y de control disponible con el sistema radar o en la misma unidad de control en los más antiguos. La elección del número de impulsos depende del tipo de trabajo a ejecutar y sobretodo, de la velocidad de desplazamiento de la antena sobre el terreno.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La unidad central, en los primeros sistemas, permite visualizar los impulsos en tiempo real, bien mediante un osciloscopio que lleva incorporado, o bien mediante el envío de la señal al monitor del propio GPR. También lleva incorporada una grabadora digital capaz de almacenar los registros, como ficheros el procesamiento y la interpretación ulterior de los registros.

En los sistemas mas recientes, la unidad central digitaliza los impulsos recibidos de la antena receptora y se transfiera a un portátil a través el puerto ECP mediante un cable de comunicación estándar. Estos datos se visualizan con un programa de control y procesamiento especial para cada modelo de GPR respecto al fabricante.

En general, los programas de GPR permiten de controlar los principales parámetros de condición de adquisición de registros radar o radargramas. Se puede elegir y variar la ventana de tiempos visualizada en función de la penetración deseada para cada caso y

antena. Disponen de filtros de alta y baja frecuencia para poder eliminar parcialmente el ruido en forma de frecuencias no deseadas y de amplificadores de ganancia de la señal, que facilitan de esta forma la identificación de las reflexiones más profundas con un grado de atenuación superior.

7.7.2 Antenas.

Las antenas son una parte fundamental del equipo ya que son los elementos encargados tanto de emitir el pulso electromagnético al medio como de recibir la energía que regresa a la superficie tras haber sufrido una reflexión.

Las antenas se conectan con la unidad de control mediante un cableado que puede ser metálico u óptico. Este último es el más adecuado para el caso de frecuencias bajas (por debajo de los 100 MHz), ya que los metálicos generan corrientes parásitas que quedan registradas en la señal como ruido electrónico de fondo. Este efecto es más notable cuando se trabaja con bajas frecuencias, necesarias para rangos mayores de tiempo doble de propagación.

Las antenas se utilizan para realizar dos funciones básicas en la prospección con GPR: deben radiar la energía que se les suministra en forma de potencia con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación pensada, y deben recibir la parte que se refleja en las discontinuidades electromagnéticas del medio y regresa hacia la superficie sobre la que se coloca la antena. Cuando utilizamos las antenas en estudios de prospección es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una única dirección. Esto permite mejorar la relación señal/ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado (mayor profundidad de estudio). La disminución del ruido se produce porque al emitir la energía únicamente hacia el interior del medio de estudio se evitan las reflexiones en objetos externos. Por este motivo es habitual el empleo de antenas direccionales y apantalladas.

Una forma muy común de caracterizar a las antenas es por la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda del pulso emitido depende de esta frecuencia y de la velocidad de la onda en el medio a través de la conocida expresión:

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Siendo *v* la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio donde se produce la propagación (si la onda se propaga en el aire, esta velocidad puede tomarse como la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío, c), λ. la longitud de la onda en dicho medio y f la frecuencia del pulso emitido.

De este modo, las antenas que se utilizan en prospección con radar de subsuelo quedan determinadas totalmente por la frecuencia del pulso que emiten al radiar, ya que la longitud de onda de la energía radiada dependerá de las características del medio por el que se propaga. Se puede definir una antena dando únicamente la frecuencia central a la que está emitiendo y su ancho de banda. Normalmente, en los GPR esta banda tiene una anchura frecuencial aproximadamente del mismo orden que su frecuencia central.
Las antenas pueden tener diferentes tipos de configuración:

7.7.2.1 Modo Monoestático

Las antenas monoestáticas son a la vez emisoras y receptoras de la energía. Pueden diferenciarse dos tipos: antenas de conmutación y antenas de dos dipolos. Las primeras tienen una única espira que puede actuar como emisora y como receptora de energía. Para ello se incluye un conmutador que va modificando su actuación. Al inicio de cada traza, la antena funciona emitiendo el pulso de energía de corta duración, pasando inmediatamente a funcionar como receptora. Tras un tiempo de recepción que varía de un tipo de antena a otra, vuelve a conmutar la función y de nuevo emite un corto pulso (entre 1 ns y 100 ns), pasando a ser de nuevo receptora tras la emisión.

Las antenas de dos dipolos presentan, en el interior de la carcasa, dos dipolos separados. Uno de ellos funciona como emisor, mientras el otro es un receptor. La separación de las dos espiras es constante, y se desplazan juntas con una única carcasa que las cubre a ambas. Las antenas monoestáticas permiten realizar con facilidad perfiles, siendo utilizadas en trabajos que requieren mayor rapidez, un número elevado de perfiles o una estructura de malla para poder analizar el medio, es decir, agrupaciones de perfiles paralelos y cruzados.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Como problema principal de esta configuración monoestático son las reflexiones múltiples y por lo tanto la repetición del patrón del objetivo.

7.7.2.2 Modo Biestático

Las antenas biestáticas se componen de dos módulos separados. Por un lado se tiene la antena emisora y por otro la antena receptora. La independencia entre emisora y receptora permite variar la distancia entre ambas. Esta característica permite calcular velocidades aparentes de propagación de la onda, utilizando técnicas iguales a las que se emplean en prospección sísmica con estudios de punto medio común ("*CMP*"). También se utilizan estas antenas para estudios puntuales, obteniendo una traza en cada punto de estudio.

La limitación de la configuración biestática es la menor resolución en superficie respecto a la configuración monoestática.

7.7.3 Parámetros de las antenas.

La frecuencia central de una emisión es uno de los parámetros de las antenas más importantes. Éste determina la penetración de la señal emitida en los materiales del medio a estudiar.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Otra de las características de las antenas es la anchura de banda de la emisión, centrada en la frecuencia que caracteriza al equipo. Como interesa que el pulso que emite una antena tenga una duración corta, la anchura de la banda de frecuencias tiene que ser grande. De este modo, por ejemplo, una antena que emita a una frecuencia central de 100 MHz puede estar emitiendo en una banda centrada en los 100 MHz con un ancho de banda del mismo orden magnitud, o sea, situado entre los 50 MHz y los 150 MHz.

El ancho de banda de este tipo de antenas provoca una pérdida de energía por dispersión. La atenuación de la señal para una misma frecuencia central aumenta cuando la banda de frecuencias es más ancha, haciendo que la sensibilidad del aparato y el alcance del estudio disminuyan.

La frecuencia central de la emisión depende del dipolo de la antena. Este parámetro limita tanto el alcance del método (rango) como su resolución. Las emisiones a bajas frecuencias se atenúan en menor medida que las altas frecuencias, pudiendo alcanzar con las primeras profundidades mayores de estudio. Por otro lado, debido a que tienen una longitud de onda mayor que las emisiones a más alta frecuencia, la resolución obtenida es menor.

7.7.3.1 Profundidad de investigación.

Las señales del Radar no suelen penetrar en el terreno y se atenúan rápidamente dependiendo del tipo de terreno en el que estén penetrando. No hay una respuesta adecuada a esta pregunta, porque depende del tipo de suelo, del tamaño del objetivo buscado y del contraste entre materiales.

Como regla general, GPR trabaja bien en muchas áreas y puede resolver problemas como ninguna otra solución posible; encontrar objetos que no se podrían encontrar de otra manera, pero habrá sin duda algunas situaciones en las que no funcionara tan eficazmente.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

El metal se ve a más profundidad que una estructura de hormigón, y esta se podrá ver a su vez a más profundidad que una infraestructura de plástico.

Objetos grandes se verán a más profundidad que objetos pequeños. Arenas y/o terrenos no metálicos y no conductivos son buenos. Terrenos conductivos, especialmente mojados no son buenos. Aguas limpias y dulces son buenas, el agua salada no lo es.

En buenas condiciones, un radar puede ver a unos 10 o 20 pies (5 m). En condiciones realmente malas apenas un par de pulgadas. Antenas de frecuencia baja se usan para ver a varias decenas de pies, pero esto limita la resolución. Esto es bueno para cartografiar la estructura geológica pero no para encontrar objetos. Si usamos una antena de alta frecuencia perderemos profundidad de investigación pero ganaremos en resolución.

7.7.3.2 El tipo del suelo

En general, en todos los estudios experimentales efectuados con GPR, se ha observado que la frecuencia de la emisión es un factor importante para determinar la atenuación de la señal. Por ejemplo, en el modelo propuesto por Cook (1975) (Fig. 74), se puede apreciar que, por ejemplo, el carbón es un medio que permite una buena profundidad de penetración cuando se trabaja con frecuencias por debajo de los 400 MHz, pero que para frecuencias superiores disminuye rápidamente este factor. Una tendencia similar se observa para la arcilla, que presentan una muy fuerte dependencia con la frecuencia. Otros materiales, aunque no de forma tan acusada, también presentan esta tendencia.

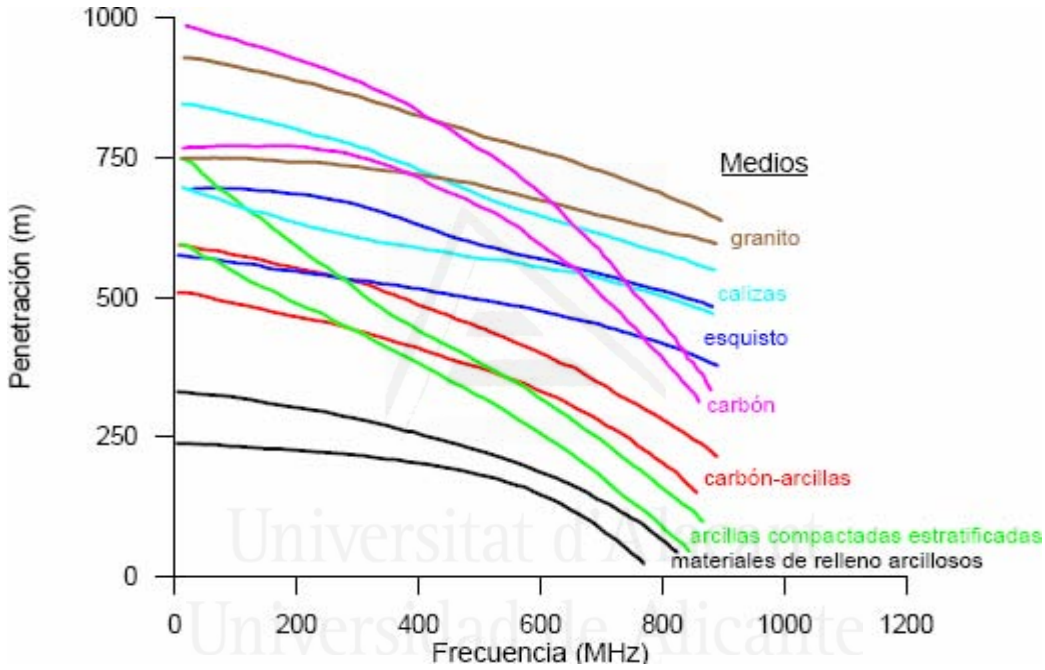


Figura 74. Gráfica obtenida por Cook (1975) en la que se presenta la penetración de las ondas de GPR en función de la frecuencia para diferentes tipos de rocas. La banda para cada una de las rocas está limitada por la función del radar, considerada para este trabajo entre 100 dB y 150 dB.

La profundidad de la penetración de la señal depende de las características eléctricas del suelo, tales como la atenuación, permeabilidad, conductividad y constante dieléctrica (Figura 75). La heterogeneidad del suelo también influencia la calidad de la imagen. Los diferentes tipos de suelo tienen diversas características eléctricas. Por ejemplo la arena tiene una constante dieléctrica muy baja, dando como resultado una tarifa baja de

la atenuación para la onda electromagnética en frecuencia de GPR. La arcilla por otra parte causa un índice de la atenuación muy alta de la señal de GPR. Consecuentemente, la señal de GPR no puede penetrar demasiado profundamente en el suelo donde hay alta concentración de la arcilla.

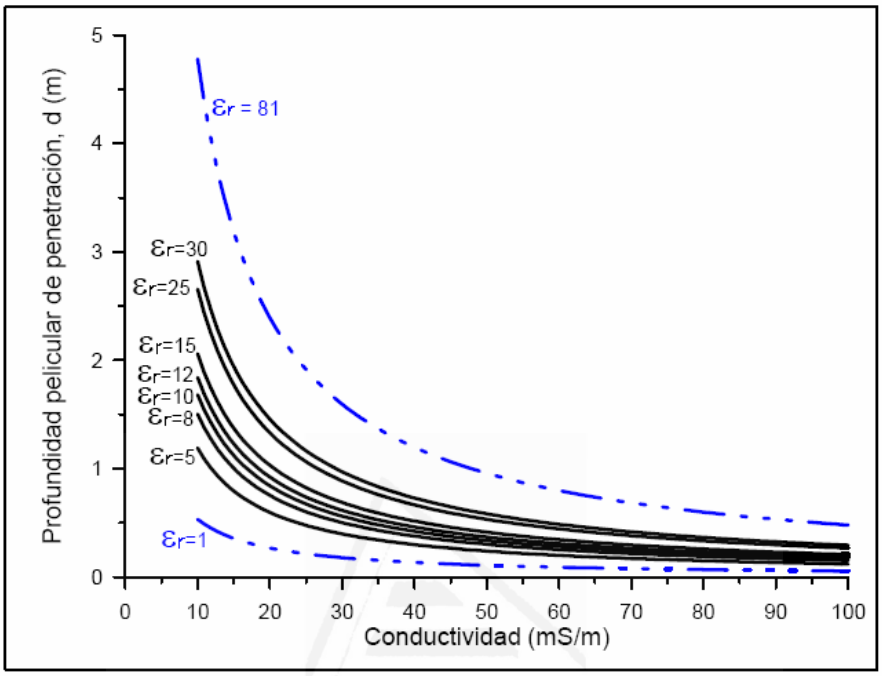


Figura 75. Curvas de profundidad de penetración (en m) en función de σ (en mS/m) para diferentes valores de permitividad dieléctrica (efectiva) característicos de materiales del subsuelo**.**

La humedad contenido en el suelo influye en sus características eléctricas. Aumenta generalmente la atenuación y en algunos casos a la capa de suelo con contenido de humedad muy alto puede causar una reflexión fuerte de la señal de GPR.

Encontramos estudios en los que, concluye Peréz, 2001, tanto el contenido de agua como el grado de compactación de un suelo tienen un efecto considerable en su permitividad y su conductividad. La relación entre el primer parámetro y el contenido de agua los aproxima a series logarítmicas. Los dos parámetros están fuertemente relacionados con las propiedades geotécnicas del suelo, tales como su compactación, su contenido de humedad y su límite plástico. En muchos casos se observa dispersión frecuencial.

7.8 MATERIAL Y METODOS.

7.8.1 Zona de estudio.

El sitio donde se llevo a cabo la fase experimental y la toma de datos del GPR se localizo en la pinada de Guardamar del Segura. Las características de la zona aparecen descritas en el capítulo 2.

7.8.2 Equipo utilizado.

Para estudiar el sistema radicular de las dos especies arbóreas se utilizo el RAMAC/GPR fabricado por MALA GeoScience (Fig. 76), combinando tres tipos de antenas monoestáticas Shielded de100 MHz (Fig. 77), 500 MHz (Fig. 78). y 1000 MHz (Fig. 79). Este equipo consta básicamente de un ordenador que permite hacer el setup de medida, una unidad de control que controla la emisión, recepción y registro de energía y una antena emisora-receptora de ondas electromagnéticas.

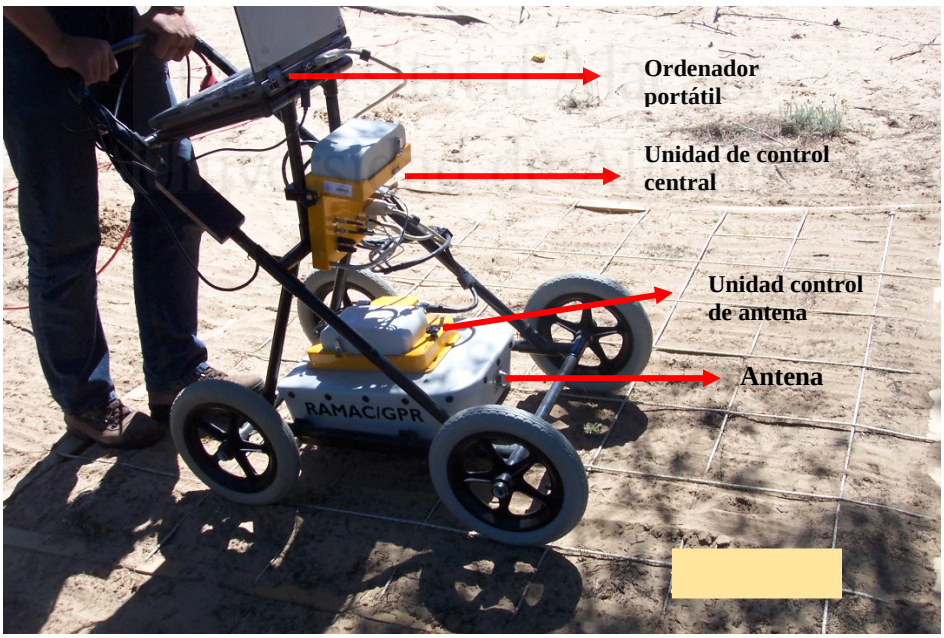


Figura 76. Equipo RAMAC/GPR utilizado para el estudio del sistema radicular.

Figura 77. Antena de 100MHz.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 78. Antena de 500MHz.

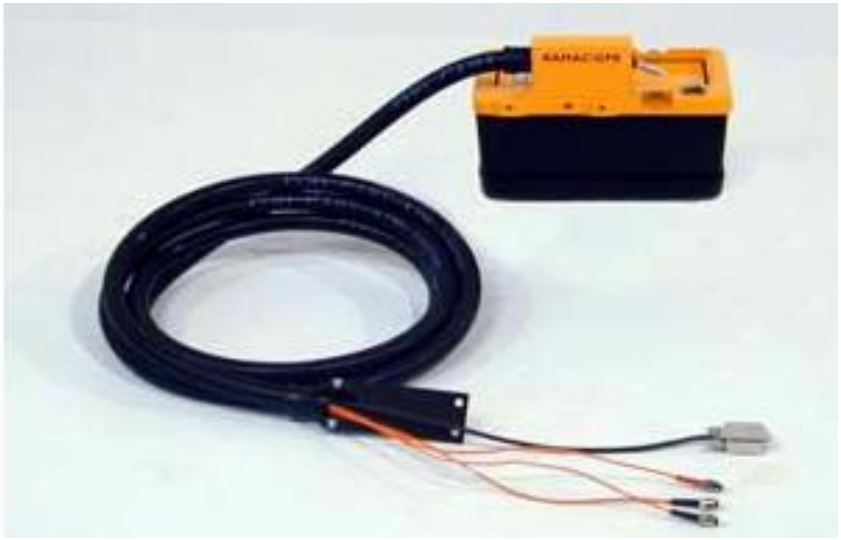


Figura 79. Antena de 1000MHz.

7.8.3 Fase experimental.

En la mayoría de equipos que hoy día existen en el mercado permiten la posibilidad de modificar y ajustar algunos de los parámetros al inicio de cada medida o investigación, esto con el objetivo de tener buena calidad en la señal la cual define los radargramas. Estos parámetros son los van a influir en la información y en una buena interpretación de los resultados. De ahí la importancia de hacer pruebas sobre el terreno antes de iniciar la adquisición de datos para que los resultados sean satisfactorios. Por lo tanto hicimos varios ensayos de detección de raíces que a continuación describiré con más detalle:

1. Antes de iniciar el estudio y recolección de datos con este tipo de técnica es fundamental hacer un cálculo de la velocidad de propagación de las ondas de georradar en el terreno. Nosotros hemos hecho este cálculo enterrado una plancha metálica (figura 80) a diferentes profundidades, luego se procedió a realizar varios registros. Por ultimo se calculo la velocidad promedio de la arena a partir de la velocidad reflejada por el objeto.

Figura 80. Plancha de duraluminio utilizada para calcular velocidad de propagación de las ondas en las dunas de Guardamar del Segura.

2. En segundo lugar se hizo una zanja de 0.5 m de ancho y de una longitud de 4,50 m como se observa en la figura 81. Posteriormente se dispusieron 5 raíces de

diferente diámetro (59 mm, 46mm, 34,3 mm, 23,09 mm y 15,60 mm) a una profundidad de 12 cm.

Figura 81. Zanja excavada con 5 raíces de diferentes diámetros.

3. Posteriormente se cubrieron las raíces con arena y se procedió hacer las mediciones con la antena Shielded de 500 MHz (Fig. 82) utilizando frecuencias de muestreo comprendidas entre 6000 a 20000 MHz.

Figura 82. Cubrimiento con arena de las 5 raíces dispuestas en la zanja y mediciones realizadas con antena de Shielded de 500 MHz.

Toda esta fase experimental sirvió para observar y corroborar la validez del equipo para registrar las anomalías producidas por las raíces, de igual manera para buscar frecuencias de muestreo idóneas para este tipo de ambientes.

7.8.4 Metodología aplicada en el estudio del sistema radicular de las dos especies de pino del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

La metodología empleada para el estudio del sistema radicular de las dos especies arbóreas dominantes consintió en:

1. Seleccionar árboles con un DBH superior a 25 cm. Luego se procedió a colocar a 1 m de la base del tronco una malla de 2x2 m y de 25x25 cm espacio como se muestra en la figura 83, también se hizo un cuadrado de 4x4 m cuyo centro fuese el árbol y se trazaron perfiles cada 25 cm en los dos sentidos. Asimismo se utilizo una lámina de cartón de 1x1 m marcando la separación (15 cm) y sentido de los perfiles como se observa en la figura 84.

Figura 83. Preparación de las mallas que sirven de referencia al desenterrar las raíces y al mismo tiempo de guía para la antena de GPR..

Figura 84. Lámina de cartón marcada con los perfiles y antena de 1000MHz usada para tomar registros.

2. Para la adquisición de datos se emplearon tres tipos de antenas: En primer lugar se uso una de 100 MHz con una frecuencia de muestreo de 2000 MHz y realizando perfiles perpendiculares a la costa. Seguidamente se utilizo una de 500 MHz usando una frecuencia de 18000 MHz y por ultimo se utilizo una antena de 1000 MHz con una frecuencia de muestreo de 29000 MHz. Asimismo se usaron otros parámetros de medida como se aprecia en la figura 85.

En la figura 86 se puede observar las diferentes antenas usadas para la recolección de datos en las especies arbóreas, asimismo se aprecia en detalle los diferentes objetos utilizados para trazar los perfiles (en el caso de las antenas de 500 MHz y 1000 MHz.). Para la antena de 100 MHz se realizaron perfiles en medio de los árboles y perpendiculares a la costa.

Durante el muestreo se tenía especial cuidado con factores que pudiesen alterar las mediciones (tropiezos con algún tipo de material vegetal, saltos de la antena, deslizamiento inadecuado de la rueda, etc) y en general cualquier otro tipo de evento externo que pueda introducir en los registros ruido de alta frecuencia o anomalías que no se están investigando. Por lo tanto tener en cuenta todas estas precauciones puede repercutir en la obtención de buenos resultados.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 85. Setup de medida utilizado en las dunas de Guardamar del Segura.

Figura 86. Adquisición de datos con antena de 500 MHz, 1000 MHz y 100 MHz.

3. Remoción de suelo: esta se hizo tanto manual como mecánica. La primera se uso para tratar de ablandar el suelo (Fig.87a), posteriormente se usaba una sopladora como se muestras en la figura 86b, esto con el propósito de retirar toda la arena posible pero sin alterar la posición de las raíces.

Figura 87a. Remoción de suelo manualmente. **Figura 88b.** Remoción de suelo con una sopladora.

4. Por ultimo se contrastaron los datos adquiridos en el GPR con los observados, para ello se desenterraron las raíces en toda el área demarcada, la profundidad de excavación se hizo hasta aproximadamente 70 cm. Una vez descubiertas las raíces se procedió a marcar cada una de estas, luego se tomo su profundidad e intercepción en cada eje y por ultimo se midió su diámetro (Fig. 88).

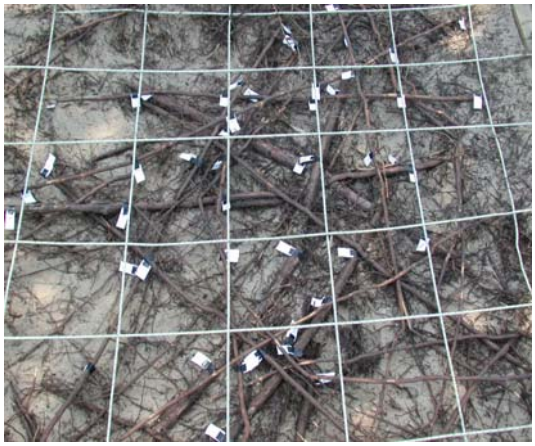


Figura 88. Identificación y medición de diámetro en las raíces desenterradas.

7.9 RESULTADOS.

La interpretación de resultados empieza desde la organización de la campaña, siendo importante cada paso que se sigue pues de ello dependen los buenos resultados y por tanto obtener conclusiones finales. Los registros algunas veces pueden interpretarse

directamente. Otras veces se requiere de tratamiento especial de señales para mejorar la relación señal/ruido o para resaltar alguna anomalía específica en nuestro caso las producidas por las raíces. Por ello cuando nos era difícil observar las anomalías acudíamos a dos tipos de software, uno llamado Gradix INTERPEX LTD., E.E.U.U 1996 y otro software llamado Ramac GroundVision versión 1.4.1. Este ultimo diseñado por Mala GeoScience el cual incluye la adquisición y tratamiento de los datos.

El calculo de la velocidad se realizo empleando la siguiente formula:

$$a = \frac{1}{4}V^2 \qquad V = 2\sqrt{a}$$

$$b = -p^2 \qquad p = \sqrt{-b}$$

V= velocidad de propagación

P= profundidad del objeto

a y b son parámetros conocidos por calculo de la recta de ajuste.

a= 89.88 y b= 0.2010

La velocidad calculada para las dunas de Guardamar del Segura fue de 90 m/μs y la profundidad a la que se encontraba la plancha de duraluminio fue aproximadamente de 45 cm. Esta velocidad permitió realizar la transformación de los datos de tiempo a profundidad y definir profundidad real de las raíces.

En la figura 89 se muestra los resultados obtenidos de las 5 raíces enterradas con la antena monoestatica de 500 MHz utilizando una frecuencia de muestreo de 18000 MHz. En este radargrama se observa claramente la forma de las hipérbolas resultantes de cada una de las raíces enterradas durante la fase experimental. El eje X representa la distancia (m) total del perfil, mientras el eje Y enseña la profundidad (m).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

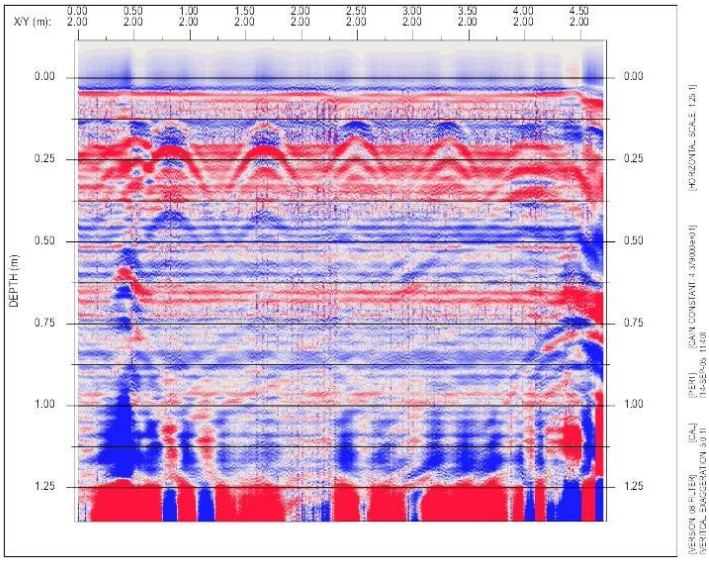


Figura 89. Perfil de calibración del GPR en las dunas de Guardamar, en este se observa las 5 raíces enterradas.

El tratamiento de este registro se hizo con el software Gradix Interpex, aprovechando la buena cantidad de filtros que tiene el programa y los cuales nos permiten eliminar o reducir aquellas señales que no correspondían a las anomalías producidas por la las raíces.

Inicialmente se trabajo con el filtro DC-Removal. Este se aplico debido a que gran parte de la energía de la señal de ondas de aire y de la onda terrestre recibida está saturada, es decir, contiene bajas frecuencias. Una vez cumplido este paso previo se aplicaron otros filtros como el declip, skipe, set time zero, gain, drif removal y filter los cuales permitieron mejorar. La realización de esta fase o perfil de prueba tenía como objetivos la calibración del equipo, la búsqueda de la frecuencia de muestreo y filtros idóneos en la adquisición y tratamiento de los datos, algunos autores como Conyers y Goodman, 1997 señalan que es muy importante conocer el comportamiento de las antenas y los rangos de frecuencias en el medio a investigar.

Una vez conocido el tipo de anomalías producidas por las raíces en un radargrama, el paso siguiente fue comparar los registros obtenidos con el GPR y los datos observados en campo (desenterrando las raíces).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

En la figura 90 se representa la ubicación, separación y sentido de los perfiles en un árbol *Pinus halepensis* Miller del ecosistema dunar de Guardamar del Segura. Este caso corresponde a la malla 2x2 m. Esta representación de cada uno de los perfiles se hizo con el software Gradix, el cual permite hacer un esquema grafico con dirección de cada perfil y de anomalías producidas en cada uno de ellos del elemento estudiado.

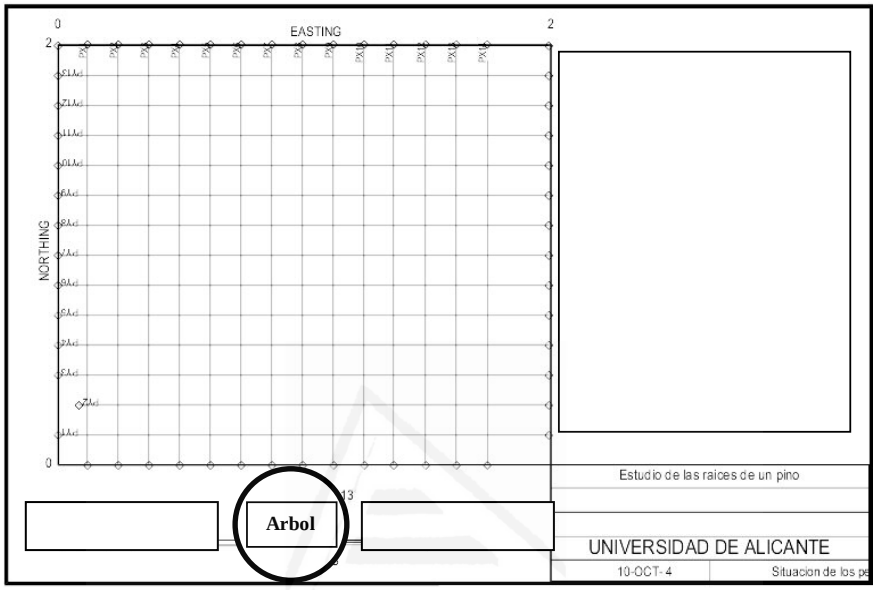
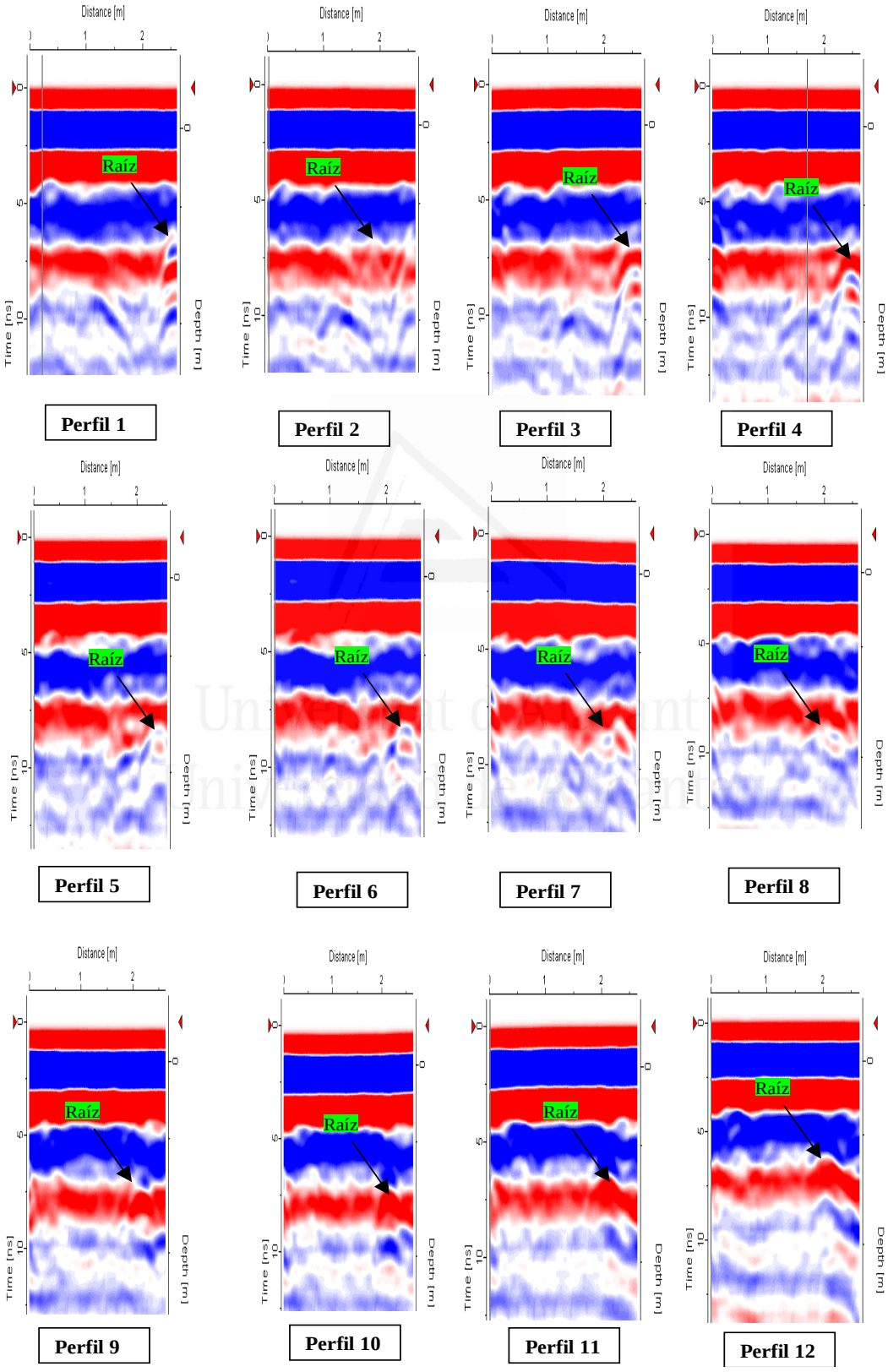


Figura 90. Representación en planta de los perfiles realizados con antena de 500 Mhz en un árbol *Pinus halepensis* Miller.

En la figura 91 se muestran 14 registros en amplitudes de anomalías producidas por las raíces. Se trata de radargramas donde se ha efectuado un relleno en color azul, rojo y blanco, este último representa las amplitudes mayores. Estos colores fueron elegidos según nuestra propia experiencia. No existe un grid de colores adecuados para resaltar estas amplitudes, esta depende de los criterios del operador que trabaja con los ficheros (Vega, 2001). En el entorno dunar de Guardamar del Segura la profundidad de las raíces es muy variable, pero utilizando antenas de 500 MHz y de 100 MHz podemos garantizar una buena profundidad de investigación siempre que se elija la adecuada frecuencia de muestreo y no exista influencia del agua salada. Nosotros ensayamos diferentes frecuencias de muestreo con estas antenas en por lo menos ocho individuos de las dos especies, siendo la de 18000 MHz en la antena de 500 MHz la que nos brindo los mejores resultados, alcanzando en algunos sitios una profundidad de investigación hasta 2 m. Estos radargramas que mostramos a continuación corresponden a igual

numero de perfiles horizontales medidos en este árbol, en ellos se muestra el seguimiento que se hizo a una raíz de diámetro de 16, 1 mm. Las anomalías producidas por esta raíz se contrastaron realizando el desenterramiento en el área donde se coloco la malla (figura 92).



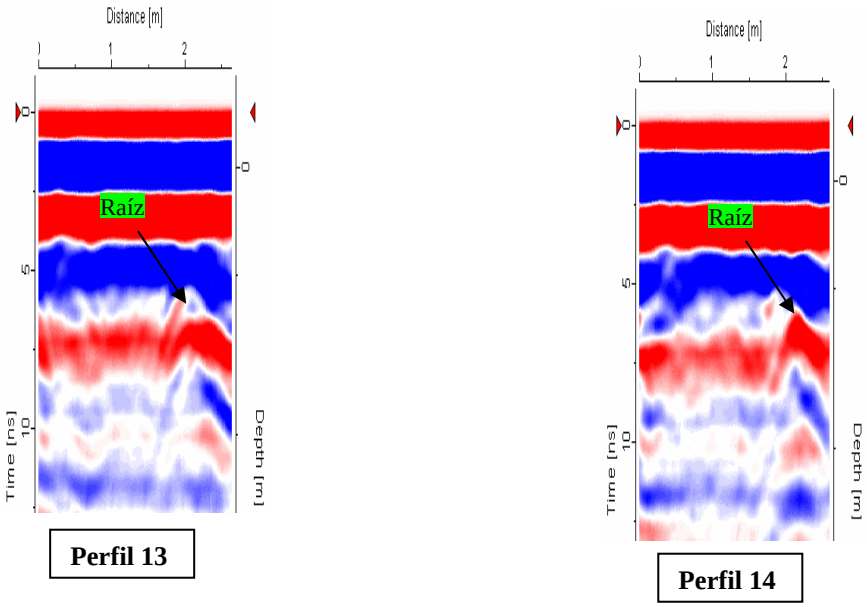


Figura 91. Radargramas de perfiles medidos en la coordenada x, en ellos esta marcado la anomalía producida en este caso por una raíz

Figura 92. Desenterramiento y etiquetado de la raíz de un árbol *Pinus halepesis* Miller.

En la figura 93 apreciamos claramente las anomalías producidas por las raíces, en un de los perfiles perpendiculares a la costa medidos con esta misma antena (500 MHz), la longitud de estos fue aproximadamente de 26 m. El tratamiento de los registros se hizo con el software Ramac groudvision, aplicando los filtros DC-Removal, Band Pass y Running Average. En estos se observa que la mayor densidad de raíces se localiza a

profundidades comprendidas entre 0,20 a 0,80 m, la profundidad alcanzada con esta antena y a una frecuencia de muestreo entorno a los 18000 MHz fue de 2m. Además por las excavaciones realizadas en más de 8 árboles permitieron corroborar que las raíces alcanzan una profundidad máxima de 0,80 m (figura 94) y en registros numéricos obtenidos en campo (tabla 33) generada en uno de estos desenterramientos.

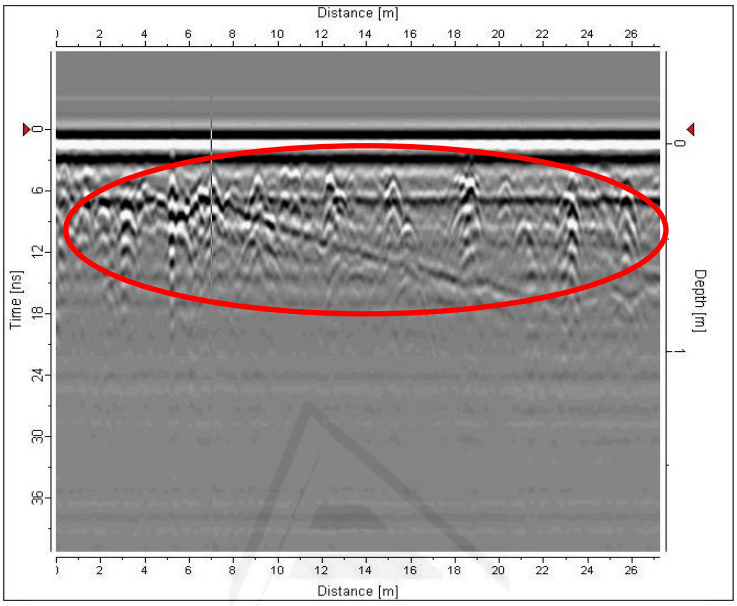


Figura 93. Perfiles de 26 m efectuados con antena apantallada de 500 MHz donde se destacan las reflexiones relacionadas con las raíces.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Interseccion	Profundidad (cm)	Diametro (mm)
S01	9	12,65
S02	14	12,72
S03	15	12,77
S04	16	12,6
S05	18	12,5
S06	20	11,27
S07	16,5	5,59
S08	17	16
S09	11	10,79
S10	19	10,45
S11	16,5	4,58
S12	12	9,97
S13	13,5	10,53
S14	21	10,82
S15	21	17,18
S16	21	10,09
S17	16	5,96
S18	67,5	19,36
S19	68,5	19
S20	43,5	10,17
S21	16	6,85
S22	16	6,85
S23	58,5	6,65
S24	56,5	6,23
S25	19	5,35
S26	17	6
S27	19	6,65
S28	19	6,08
S29	22	6,03

Tabla 33. Registro de datos (intersección, profundidad y diámetro) de las raíces después del desenterramiento de un árbol.

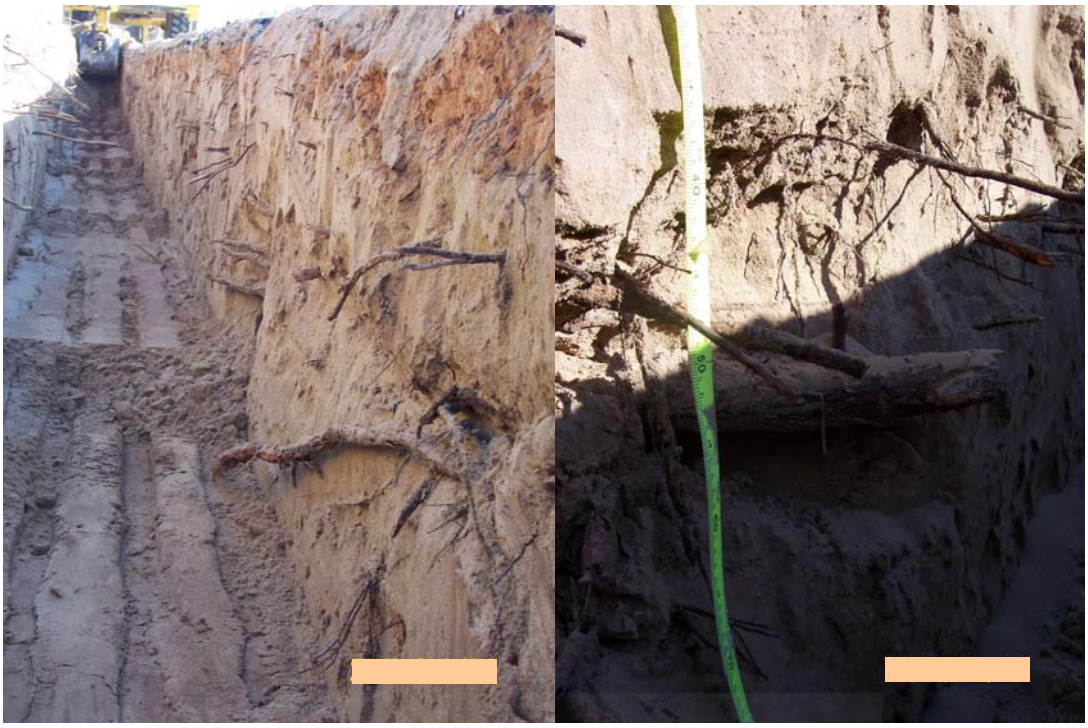


Figura 94. Profundidad observada de las raíces mediante una excavación realizada por el ayuntamiento en las dunas.

Con respecto a los datos obtenidos con la antena de 100 MHz (Fig. 95) se pueden destacar los siguientes aspectos: al ser una antena de menor frecuencia su penetración en el subsuelo es mayor, permitiendo llegar a una profundidad de 10 m en un perfil de 76 m. Si bien la amplitud de las reflexiones asociadas se ve atenuadas con respecto a los registros anteriores. Su menor resolución hace que sea un poco difícil apreciar algunas reflexiones internas relacionadas con las raíces. Sin embargo esta antena muestra con claridad otro tipo de anomalía en este caso seria el contacto arena-roca a partir del metro 26 y a profundidades comprendidas entre 0,10 a 1,50 m como se muestra en el ovalo de color rojo de este radargrama. Es posible que estas reflexiones estén relacionadas con la estratigrafía interna de las dunas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

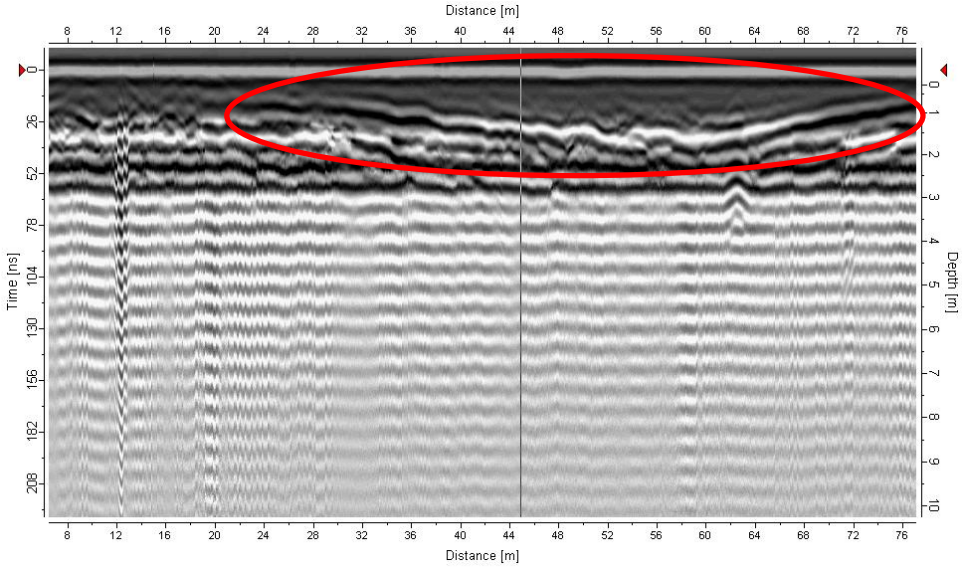


Figura 95. Perfil de 76 m efectuados con una antena apantallada de 100 MHz donde se detectan reflexiones ocasionadas por otro tipo de anomalías.

La figura 96 recoge un par de radargramas representativos de los registros obtenidos con la antena de 1000 MHz. El registro tiene una longitud de 90 cm, la profundidad alcanzada con una frecuencia de 28000 MHz fue de 50 cm, los filtros utilizados fueron DC-Removal y Band pass. Usando esta antena se ha mejorado la resolución vertical del registro facilitando la identificación de reflectores producidos por las raíces. Esto nos ha permitido identificar raíces del orden de 1 cm.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

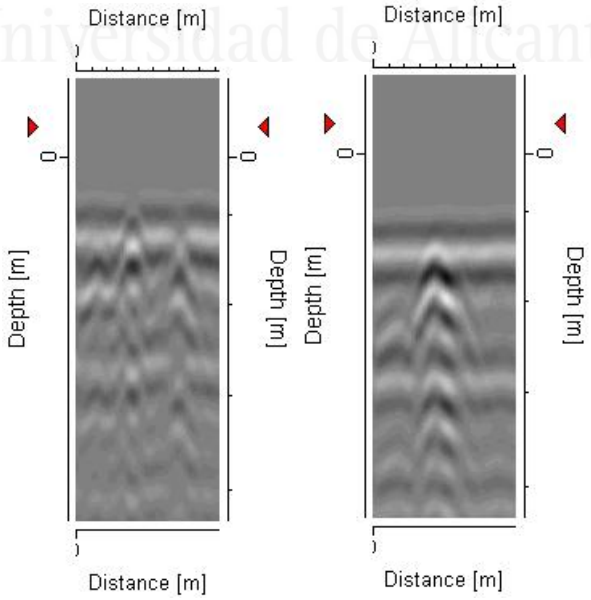


Figura 96. Radargramas obtenidos en dos perfiles registrados con la antena de 1000 MHz

La utilización de los diferentes materiales (malla y cartón) según el tipo de antena nos ha permitido hacer un seguimiento detallado en los ejes X y Y de las raíces en un área determinada, generando así una base de datos importante para posteriormente contrastarla con las anomalías presentes en cada radargrama y verificar así la utilidad que tendría esta técnica en este tipo de ecosistemas.

Después de realizar múltiples ensayos con las diferentes antenas, coincidimos en señalar que la que nos ofrecía los mejores resultados tanto de reflexión como de profundidad este tipo de ambientes era la antena de 500 MHz para. Por lo tanto quisimos hacer otro tipo de ensayo, esta vez colocando la malla alrededor del árbol como se observa en la figura 97. He de anotar que no se hizo desenhetramiento, solo nos limitamos a analizar los registros.

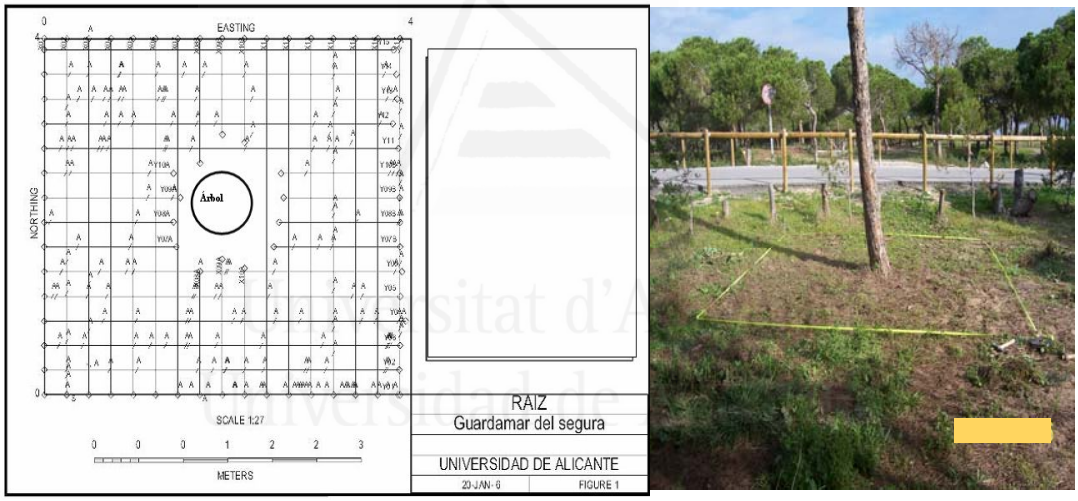


Figura 97. Registro de datos de GPR colocando una malla alrededor del árbol. También se muestra las anomalías producidas por las raíces en cada perfil.

El resultado obtenido de este ensayo se observa en la figura 98. El tratamiento de la señal se ha realizado con el software Gradix Interpex, empleando varios filtros (DC-Removal, declip, skipe, set time zero, gain, drif removal y filter. La velocidad utilizada fue de 90 m/µs. En estos radargramas se puede apreciar como existe un gran numero de raíces superficiales situadas en los primeros 50 cm y algunas pero muy pocas están por encima de 75 cm. En general la resolución obtenida en este tipo de suelos es muy buena, sobre todo si la toma de datos se realiza en épocas de verano.

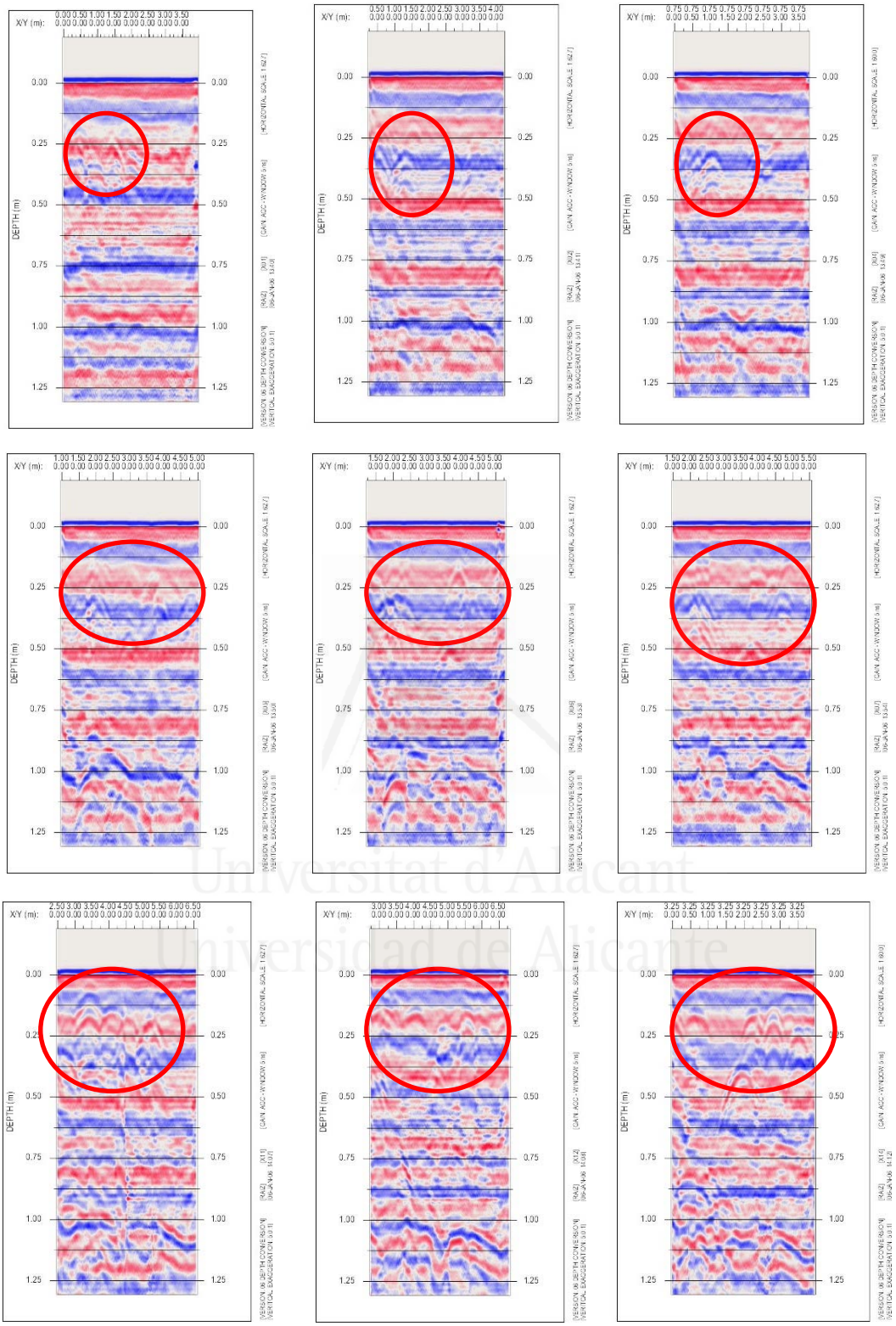


Figura 98. Radargramas obtenidos con antena de 500 MHz en un árbol de *Pinus pinea* L.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

De igual forma queríamos contrastamos los datos de GPR utilizando la antena de 500 MHz con una frecuencia de muestreo de 18000 MHz en un perfil más largo, por ello se aprovecho una zanja construida en el sistema dunar cuyas medidas eran 15 m de longitud y tenía una profundidad aproximada de 1 m. Los resultados de esta comparación se muestran en la figura 99. En el radargrama podemos observar las anomalías producidas por las raíces, asimismo se aprecia que estas no sobrepasan profundidades mayores de 80 cm, manteniéndose estas en los perfiles con mayor contenido de humedad.

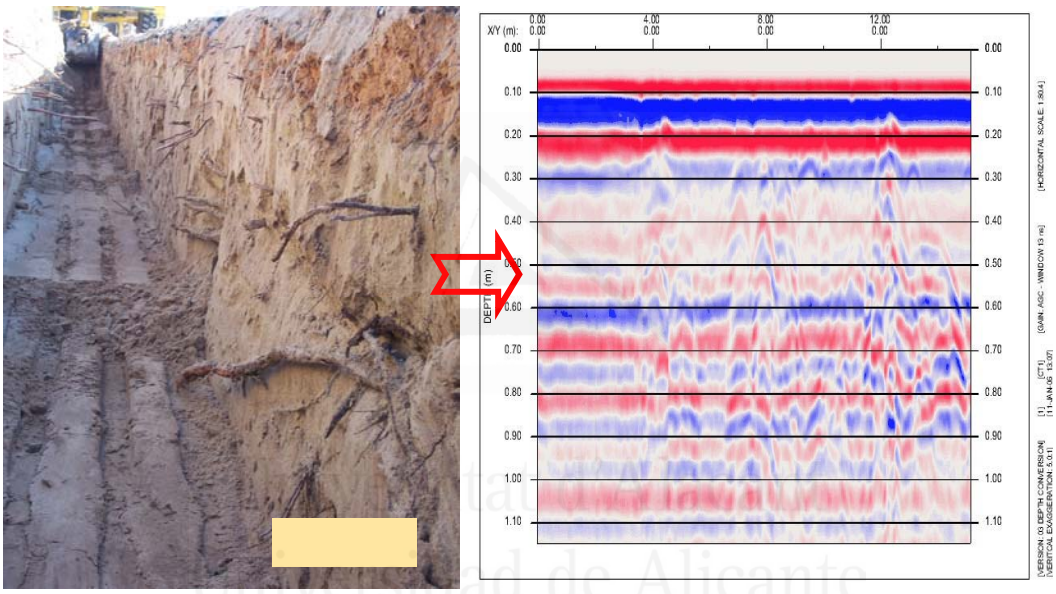


Figura 99. Zanja que sirvió para contrastar y apoyar la investigación del sistema radicular del ecosistema dunar asimismo en el radargrama donde se muestran las anomalías producidas por las raíces.

7. 10 CONCLUSIONES

- Después de haber realizado varios ensayos con diferentes antenas (100 MHz, 500 MHz y 1000MHz) y múltiples frecuencias de muestreo, estamos convencidos que la técnica del GPR es una excelente alternativa para el estudio del sistema radicular de especies arbóreas en ecosistemas dunares.

- El método del GPR es una técnica geofísica que permite estudiar anomalías, en nuestro caso las producidas por las raíces sin generar ningún tipo de

impacto ambiental, convirtiéndose así en un método no invasivo y no agresivo.

- La antena que mejores resultados proporciono en este tipo de ambientes fue la de 500 MHz, utilizando una frecuencia de muestreo de 18000 MHz. Esta nos permitió obtener una mayor resolución de las anomalías producidas por las raíces.

- La profundidad de investigación alcanzada con la antena de 500 MHz fue de 3,5 m, profundidad suficiente para estudiar el sistema radicular de las especies de pino del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

- La antena de 1000 MHz ofrece buenos resultados pero solo a profundidades no mayores de 50 cm.

- Los resultados observados con la antena de 100 MHz muestran que esta alcanza una mayor profundidad de investigación, pero se obtiene menor resolución de las anomalías producidas por las raíces.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO VIII
APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS AGUA Y NUTRIENTES POR LA PINADA

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

8.0 INTRODUCCIÓN

Habitamos un universo con cambios cada vez más vertiginosos, donde la gestión forestal se tiene que adaptar a requerimientos específicos de cada ecosistema. En este escenario cambiante y complejo, cobra cada vez más importancia el conocimiento del funcionamiento de los sistemas. Los flujos de agua y algunos nutrientes en un ambiente tan hostil como el bioma dunar costero de Guardamar del Segura serán imprescindibles para realizar cualquier tipo de actuación.

En este último apartado hemos querido extraer y relacionar algunos aspectos de cada capítulo, con el objetivo de conocer más y mejor sobre el funcionamiento de este ecosistema dunar, en relación con los dos aspectos más críticos en este tipo de biomas (Agua y Nutrientes).

A lo largo de los capítulos III, IV y V, se han tratado todos los aspectos referentes a las características químicas de la precipitación, trascolación y escorrentía cortical, en las especies dominantes del ecosistema dunar de Guardamar del Segura. Las comparaciones de cada uno de los flujos nos permiten conocer los aspectos diferenciales que pueden introducir cada una de las especies de pino.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Comparando la química de los tres flujos (Figura. 100), se observa que la carga iónica total medida en µeq/l de la escorrentía cortical es superior en las dos especies, a la de los flujos de deposición global y la trascolación. La deposición global representa un 15,94% del total de los iones analizados, mientras la trascolación un 39,43% y la escorrentía cortical un 44,63%. Es decir el agua que llega al suelo por la vía de trascolación y escorrentía cortical sufren enriquecimientos iónicos. Es decir a través de estos porcentajes observamos como la vegetación retiene algunos nutrientes y posteriormente los deposita al suelo.

En general, detectamos que todos los iones tienen una misma importancia relativa en los tres flujos estudiados del ecosistema dunar de Guardamar del Segura, es decir tanto la precipitación, la trascolación como la escorrentía cortical hay una secuencia de los iones presentes en el agua en el siguiente orden: $Ca^{2+} > Cl^{-} > Na^{+} > S04^{=} > Mg^{2+} > N03^{-} > K^{+}$.

También hemos de anotar que existen diferencias significativas entre las concentraciones medias de algunos iones en la trascolación y escorrentía cortical (tabla 34). Es difícil encontrar razones biológicas o físicas para explicar estas diferencias, puesto que las copas son potencialmente mejores captadores de iones externos que los troncos, pero también la rugosidad y forma de los troncos pueden influir, asimismo las fuentes principales de los iones de origen interno, o quizás la fauna y la escasa flora asociada a los troncos y ramas, o la eficiencia intercambiadora de las cortezas sea el factor principal.

ANOVA	Sig.
Ca^{2+}	0,96
Mg^{2+}	0,10
K^{+}	0,16
Na^{+}	0,45
Cl^{-}	0,60
$(N0_3)^{-}$	0,00
$(S0_4)^{2-}$	0,02

Tabla 34. Resultados de la ANOVA factorial para la trascolación y escorrentía cortical.

8.1. TASAS DE ENRIQUECIMIENTO DE LA TRASCOLACIÓN Y ESCORRENTIA CORTICAL EN LAS DOS ESPECIES DEL ECOSISTEMA DUNAR.

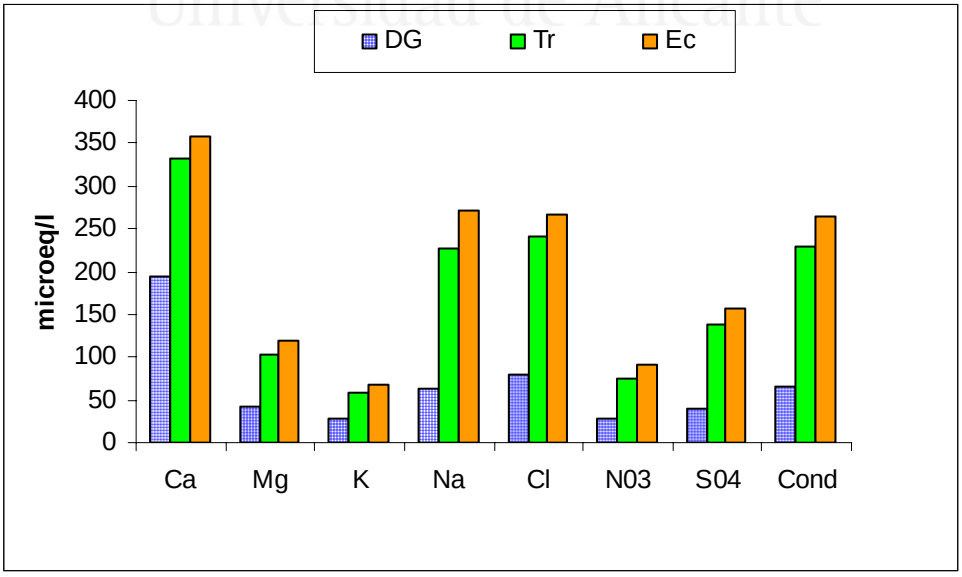


Figura 100. Concentraciones iónicas de los tres flujos (Deposición Global, Trascolación y Escorrentía cortical) en la pinada de Guardamar del Segura.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Si comparamos las tasas de enriquecimiento en los dos flujos se observa que las concentraciones son mayores en la escorrentía cortical de todos los iones en las dos especies como se muestra en la figura 101 y 102. En bibliografía consultada (Carlisle *et al*., 1966; Jordan 1978; Kelly y Strickland 1986; Bellot 1989) dan múltiples ejemplos que ratifican estos cambios en las concentraciones de los dos flujos, para distintas especies y en distintos lugares.

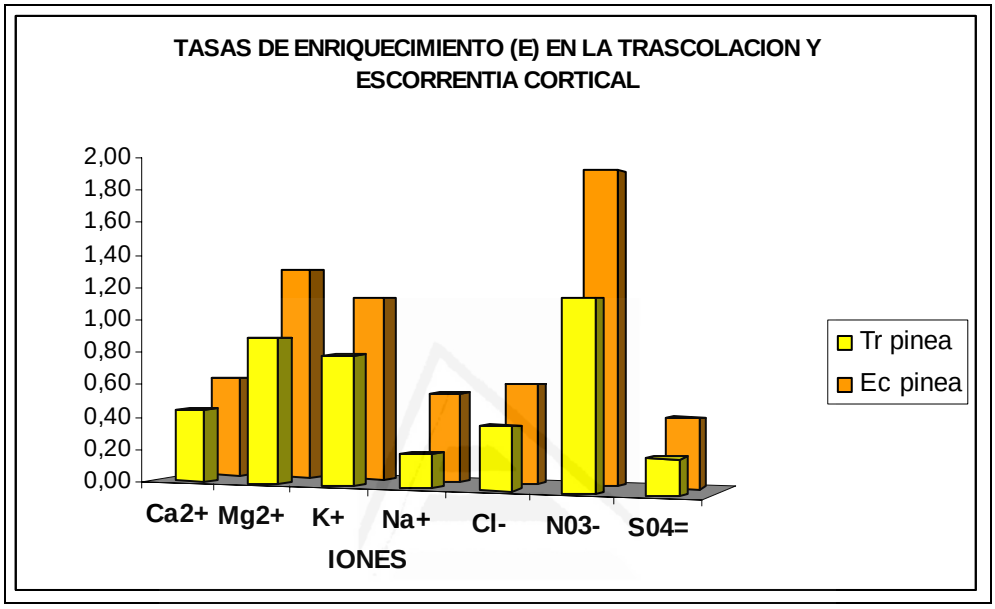


Figura 101. Comparación entre las tasas de enriquecimiento en la trascolación y la escorrentía cortical en la especie *Pinus pinea* L.

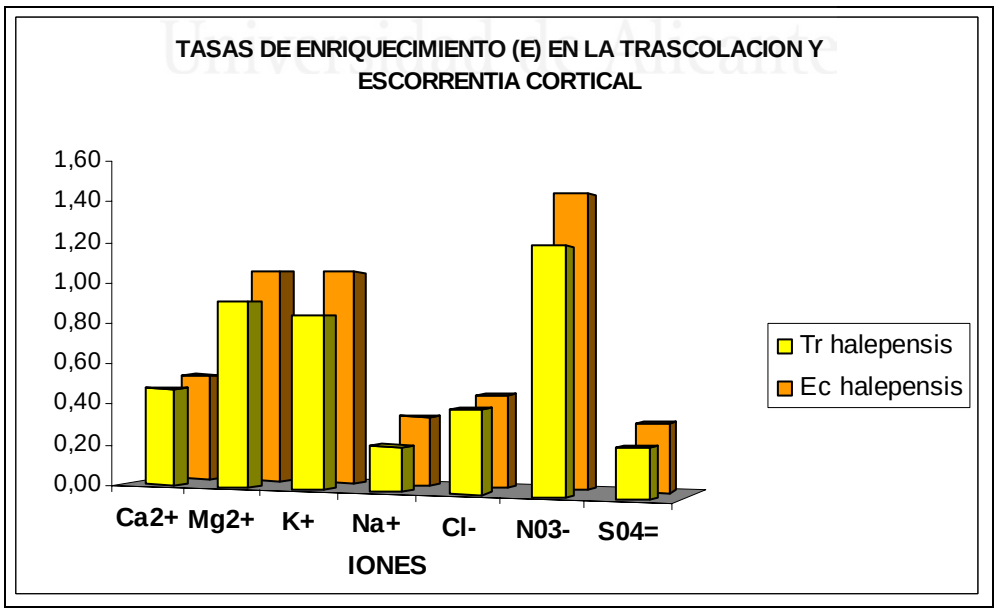


Figura 102. Comparación entre las tasas de enriquecimiento en la trascolación y la escorrentía cortical en la especie *Pinus halepensis* Miller.

A pesar de ser tan pequeñas estas cantidades aportadas al ecosistema dunar de Guardamar del Segura, hay que tener en cuenta que estos aportes se reparten en una superficie muy reducida alrededor de los troncos (Carlisle *et al*., 1967). De igual manera estos aportes pueden contribuir al sostenimiento de la masa forestal, dado que la entrada de nutrientes por otras vías es muy escasa.

El volumen de agua de agua lluvia que recibe el bosque a través de las copas de los árboles es uno de los factores que controlan la cantidad de nutrientes que llegan al suelo forestal (Zinque 1962; Ford y Deans 1978). Conociendo la totalidad de agua que circula por cada uno de los flujos (precipitación, trascolación y escorrentía cortical), su concentración y el porcentaje de cubierta vegetal de cada especie se estimarían los aportes de las entradas iónicas en K/ha al suelo (Domingo, 1991). Estos aportes de nutrientes serían los obtenidos por los pluviómetros de polietileno y que, comparando con la trascolación y escorrentía cortical, nos mostraran la eficacia que tiene la vegetación en la captación de partículas, gases y aerosoles como han apuntado diversos autores (White y Tuner, 1970; Miller *et al*., 1976).

Para estimar la cubierta vegetal de la parcela donde se llevo a cabo la investigación se utilizó la ortoimagen a escala 1:2000 del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV) del año 2005. A partir de ésta imagen se ha digitalizado la cobertura del pinar que aparece en la imagen (figura 103), finalmente se exporto la digitalización al sistema ARCVIEW donde se calculo las superficies.

Figura 103. Mapa de la parcela y cubierta vegetal estimada con ARCVIEW.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

La distribución de la biomasa vegetal ha sido realizada por Garcia (2005) encontrándose en la parcela una repartición mas o menos homogénea de las dos especies estudiadas en la que el 50% corresponden a *Pinus halepensis* Miller, 45% a *Pinus pinea* L. La superficie vegetal de la parcela es de 2510 m^2.

8.2. APORTES DE NUTRIENTES POR DEPOSICIÓN GLOBAL

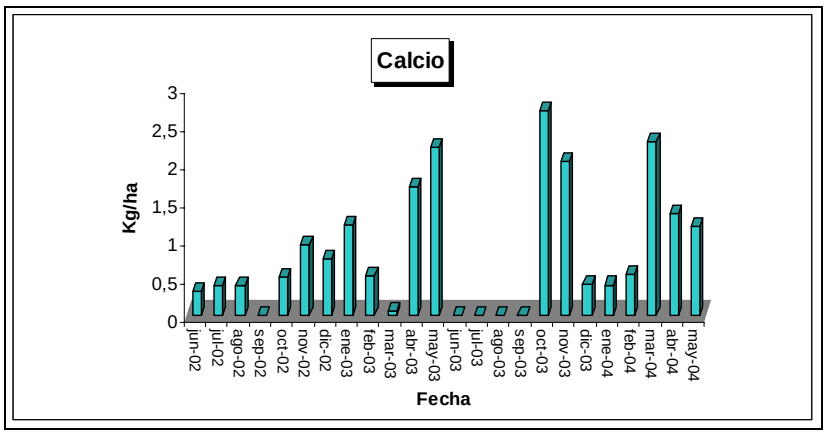
El cálculo de los aportes iónicos por el agua de lluvia al ecosistema dunar de Guardamar del Segura se estimó considerando la concentración iónica y la cantidad de precipitación. En general los periodos más lluviosos presentan aportes mayores, ya que el agua es el principal vehículo que utilizan los iones en la atmósfera para ingresar en los ecosistemas terrestres (Bellot, 1989).

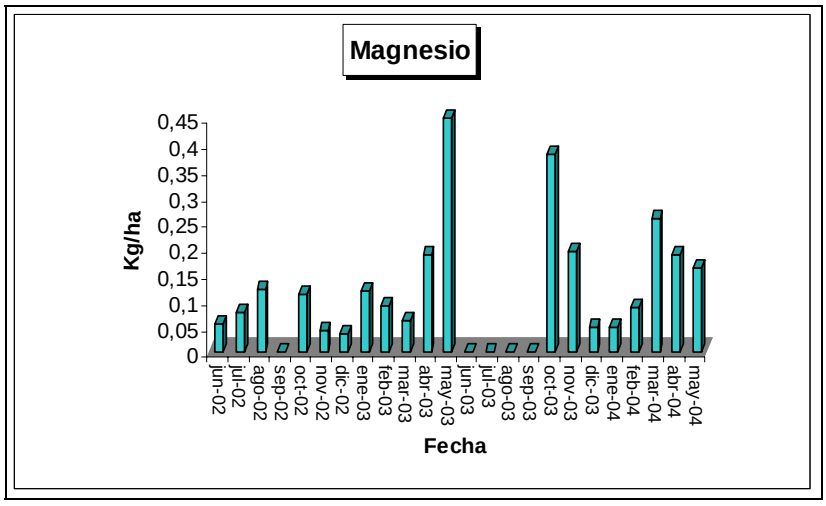
Si comparamos la evolución del volumen mensual de los aportes (figura 104), vemos que concuerdan para todos los iones estudiados Cl^-, $S04^=$, $Ca2^+$, Na^+, $Mg2^+$, K^+ y $N03^-$. Es decir presentan los máximos en los meses de Abril, Mayo, Octubre, Noviembre y los mínimos en los meses de verano.

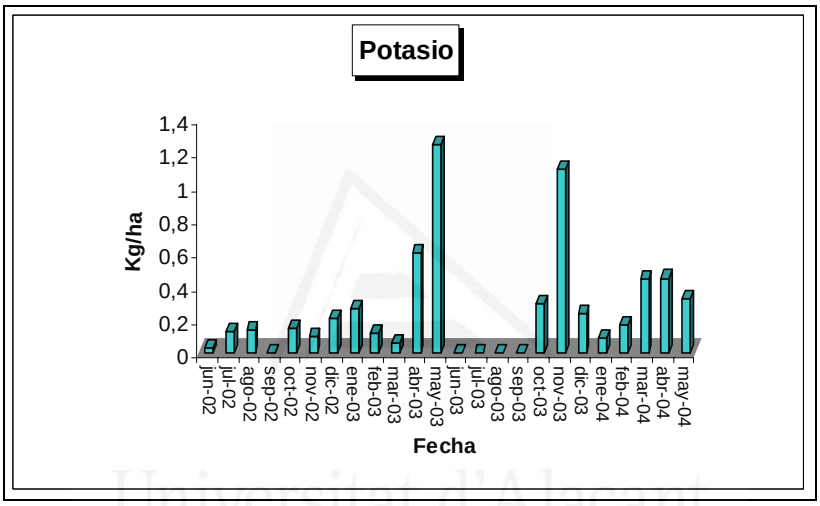
Se destaca por magnitud de sus entradas durante todo el periodo de estudio el cloruro el sulfato y calcio, Del primero entraron 30,9 Kg/ha, del segundo 23,77 Kg/ha y del tercero 19,65 Kg/ha. Son las sustancias más representadas en el agua lluvia de las dunas de Guardamar del Segura.

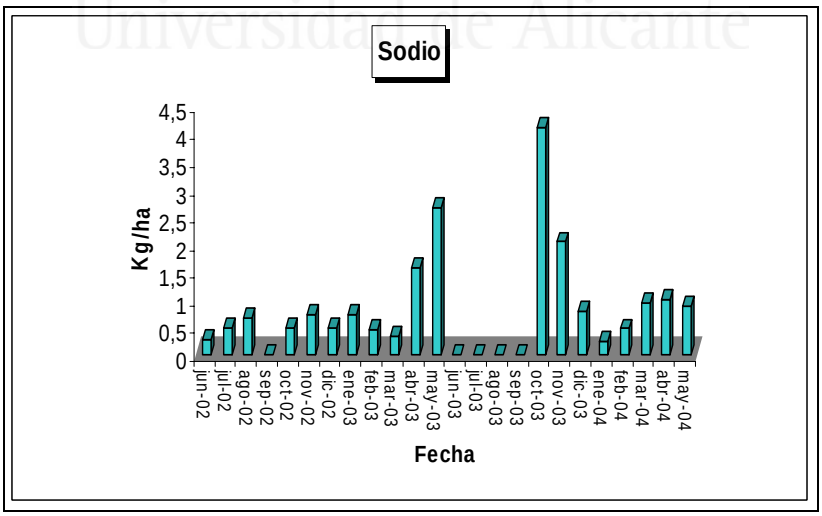
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Figura 104. Variación mensual de los aportes (Kg/ha) por deposición global en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

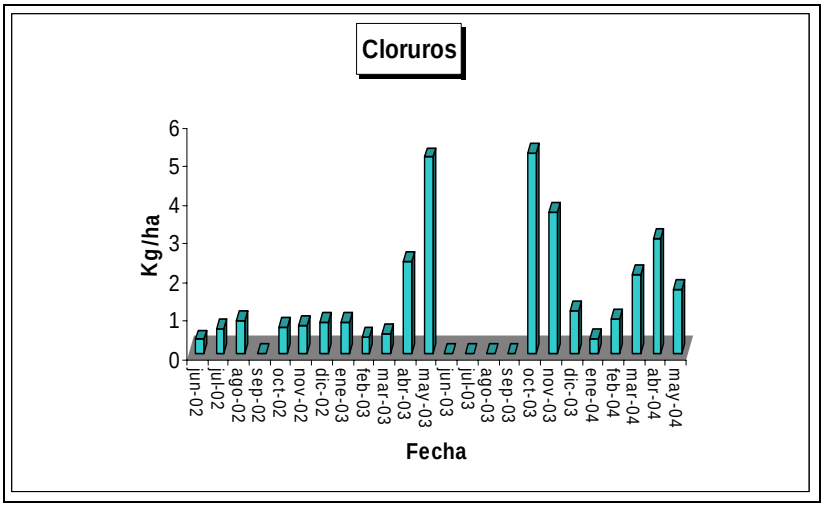


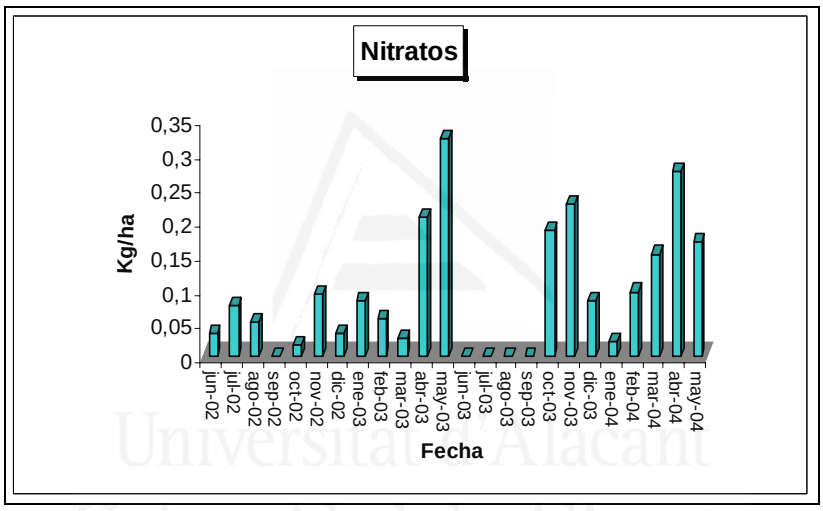


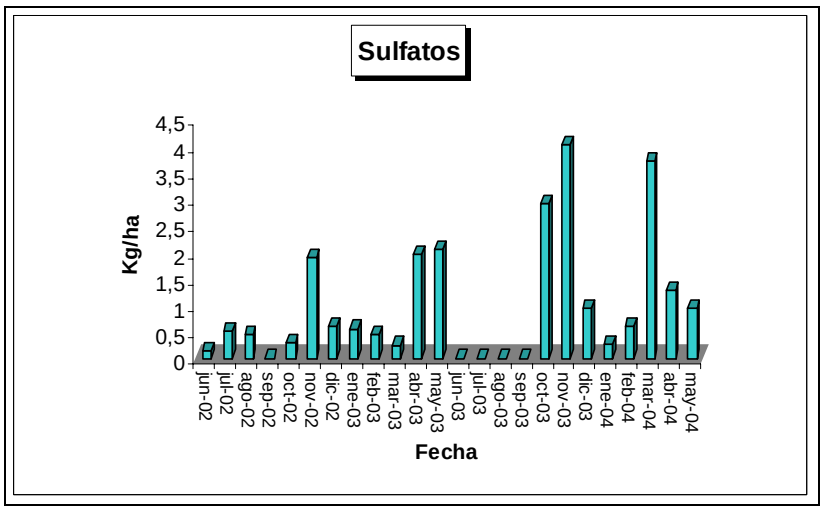




Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante







Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Los aportes de nutrientes que recibe el ecosistema dunar por unidad de superficie (ha) y por año se expresan en la tabla 35, siendo para el año 2003 el cloruro, sulfato y calcio

los iones de mayores aportes. También se aprecia que durante el periodo de estudio todos los iones presentan una gran variabilidad, inestabilidad que ha sido observada en otras zonas como la del L`Avic y Montseny (Barcelona). Swank (1984) pone de manifiesto la fluctuación que tienen los nutrientes en los ecosistemas y a su vez ratifica la importancia que tienen estos a la hora de planificar la gestión ambiental de los bosques. Este autor señala la necesidad de hacer estudios locales para estimar con precisión las entradas atmosféricas.

		Kg/ha						
Periodo	**Volumen (mm)**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**K^{+}**	**Na^{+}**	**Cl^{-}**	**$(N0_3)^{-}$**	**$(S0_4)^{2-}$**
Jun-Dic 2002	76	3,23	0,43	0,73	3,01	3,99	0,3	3,87
Año 2003	267	10,73	1,51	3,89	12,56	19	1,18	13,1
Ene-May 2004	189	5,69	0,73	1,44	3,44	7,9	0,7	6,8

Tabla 35. Aportes brutos (Kg/ha) por deposición global en los distintos periodos de estudio, para el ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

Para ilustrar la variabilidad espacial referida se han recopilado en la tabla 36 algunas estimas disponibles. En ella se compara los aportes químicos en Kg/ha de la deposición global de otras zonas de España, del área mediterránea, USA, centro y Norte de Europa. En esta tabla podemos observar que existe una gran variabilidad en todos los aportes de la precipitación en todas las zonas.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Localidad	**Volumen (mm)**	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**K^{+}**	**Na^{+}**	**Cl^{-}**	**$(N0_3)^{-}$**	**$(S0_4)^{2-}$**
Sª Filabres (Almeria,España)	674	28,8	4,87	6,74	9,9	14,25	14,23	33,04
L`Avic (Tarragona, España)	578	6,44	0,79	1,82	3,76	7,18	6,33	19,79
Montseny (Barcelona, España)	973	11,8	1,34	1,17	5,14	9,6	11,02	25,4
Zaragosa (España)	498	8,01	0,74	2,98	4,78	4,28	10,6	6,08
Galicia (España)	627	7,14	1,25	3,76	25,58	9,09	35,8	6,23
Fontainebleau (Francia)	554	8,99	2,89	2,42	No medido	No medido	20,84	8,1
Norte (Zuisa)	731	1,68	0,43	1,6	2,26	4,02	12,93	7
Hungria	549	14,65	1,75	4,17	No medido	13,39	11,41	18,05
Hubbard Brook (USA)	1320	2,2	0,6	0,9	1,6	6,2	19,7	12,81

Tabla 36. Aportes anuales por precipitación en diversas estaciones de la cuenca mediterránea, Europa y Estados Unidos.

Si contrastamos nuestros valores con los observados en la tabla 36, se observa que existe cierta similitud de algunos iones con algunas zonas de la península, en el caso de la Sierra Filabres (sodio y cloruro), Galicia y Zaragoza (calcio), Hubbard Brook (sulfatos). El calcio puede estar asociado al polvo en suspensión con altos contenidos de carbonato calcico (Carratala, 1993). Esta idea es apoyada por Avila (1987) y Bellot *et al*

(1989). El cloruro y sodio se manifestó claramente, puesto que la zona de muestreo estaba ubicada muy cerca al mar mediterráneo.

8.2.1. Extrapolación al ecosistema dunar: aportes de agua y algunos nutrientes por trascolación

El proceso de distribución de la precipitación también modifica las propiedades físicas y químicas de la lluvia. Las gotas originadas por el goteo de la copa en arbustos y vegetación de poca altura, aunque suelen tener un tamaño mayor y más constante que las de la lluvia (Chapman, 1948; Zinke, 1967), tienen menor energía cinética (Wainwright *et al*., 1999), lo cual reduce su poder erosivo y beneficia su infiltración (Whitford, 2002).

Para realizar estas estimaciones se ha tenido en cuenta los valores en porcentaje de cobertura vegetal calculados por Garcia (2005) y en ningún caso se ha valorado la superposición de las especies.

Esta distribución de las dos especies vegetales mayoritarias, nos permite conocer el efecto especifico de la cubierta vegetal en los aportes de agua al ecosistema dunar (tabla 37).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Especies	% Trascolación	% Cobertura	Volumen que llega al suelo/ha en Dm^3
P.halepensis Miller	68,86	50	1,83
P.pinea L	65,1	45	1,56

Tabla 37. Aportes de agua por trascolación en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura, teniendo en cuenta la cobertura vegetal.

Del volumen de precipitación recogido (532 mm), el porcentaje medio en las dos especies de trascolación al atravesar la vegetación presente en el sistema dunar fue de 356 mm. Es decir si imaginamos una hectárea del ecosistema dunar (con la vegetación repartida con los porcentajes de cobertura de cada especie), y aplicando los porcentajes de trascolación encontrados para cada una de ellas: de los 5,32 Dm^3/ha de agua que caerían en ella, 1.83 Dm^3/ha pasarían a través de *Pinus halepensis* Miller y 1.56 Dm^3/ha a través de *Pinus pinea* L.

El volumen de agua que recibe el bosque a través de las copas es uno de los factores que controlan la cantidad de nutrientes que llegan al suelo (Zinke 1962; Ford y Deans 1978). Conociendo la cantidad de agua que circula por este flujo y su concentración iónica se estiman los aportes. En la tabla 38 se presentan los aportes totales que reciben los suelos bajo las especies de pino, así como los aportes totales recibidos por el suelo desde la bóveda.

	Kg/ha						
Especies	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**K^{+}**	**Na^{+}**	**Cl^{-}**	**$(N0_3)^{-}$**	**$(S0_4)^{2-}$**
Pinus.pinea L	12,00	2,29	4,15	9,48	15,52	1,87	12,05
Pinus.halepensis Miller	10,49	1,97	3,66	8,17	13,43	1,64	10,48
Total	22,50	4,27	7,81	17,65	28,95	3,51	22,53

Tabla 38. Estimación de los aportes por trascolación (Kg/ha) en las dos especies del ecosistema dunar de Guardamar del Segura.

En términos generales, las dos especies generan aportes importantes. Destacan los 15,52 Kg/ha de cloruro, los 12,05 Kg/ha de sulfato y los 12 Kg/ha de calcio. Lógicamente el volumen con que contribuye cada especie a los aportes totales, es la razón principal de estas diferencias. Globalmente, las contribuciones al suelo dunar de Guardamar del Segura son considerables en cloruro (28,95 Kg/ha), sulfato (22,53 8Kg/ha) y calcio (22,50 Kg/ha).

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Estos valores registrados en la tabla 38 muestran la eficacia que tiene la vegetación en la captación de partículas, gases y aerosoles como ya han apuntado diversos investigadores (White y Tuner, 1970: Eaton *et al* 1973; Bache, 1977; Miller y Miller, 1980). Rodà (1983) sugiere una serie de razones estructurales que hacen a los árboles más eficaces en la captación de estos nutrientes. Por ejemplo, los bosques de pinos tienden a acumular más deposición seca y deposición de nieblas que los bosques de caducifolios, a causa de su mayor área foliar (Chapin *et al*. 2002).

Comparando los aportes al suelo por el efecto de la vegetación arbórea presente en el ecosistema dunar, con los provenientes de la deposición global medida en los receptores de polietileno, vemos que algunos iones como el calcio, magnesio potasio y nitratos aumentan ligeramente en el flujo de trascolación (figura 105). Por el contrario los aportes de sodio, cloruro y sulfato son mayores en la deposición global.

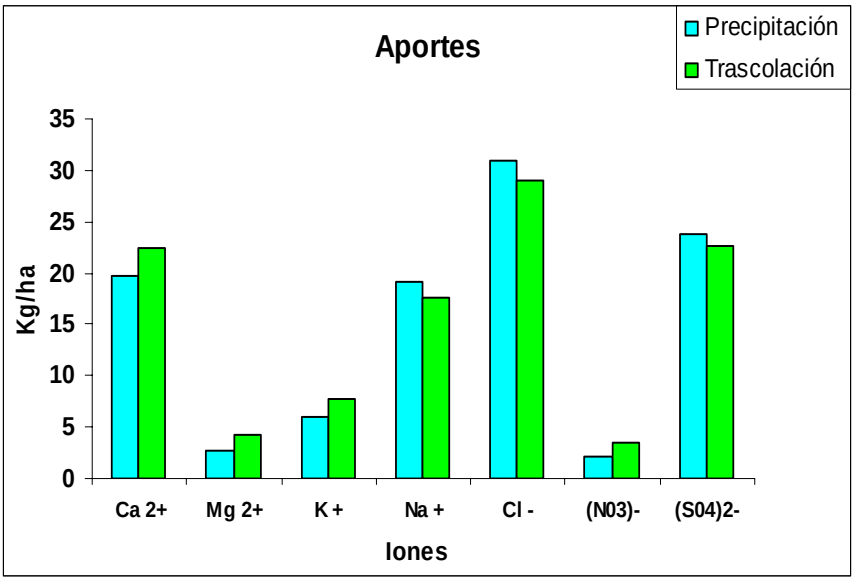


Figura 105. Aportes en Kg/ha de la deposición global y la trascolación durante todo el periodo de estudio.

En general, comparando los aportes de un año con los obtenidos en otras zonas de España, las contribuciones iónicas en nuestro ecosistema son inferiores a las encontradas por Domingo, 1991; Bellot, 1989; Rodà, 1983; Rodrigo *et al*., 2001). Hay que destacar que Guardamar del Segura es una zona con poca precipitación, lo cual influye notablemente en las contribuciones iónicas, pero a su vez por estar cerca del mar mediterráneo la química de estos aportes es muy marcada en algunos iones.

Comparar las diferencias existentes entre la deposición global y la trascolación nos ha permitido conocer el papel fundamental que tiene la vegetación como captadora de nutrientes de origen atmosférico por deposición seca.

8.3. APORTES POR ESCORRENTIA CORTICAL

La escorrentía cortical reúne la precipitación en un área muy pequeña (Watters y Price, 1988) y se infiltra por la interfase raíz-suelo alcanzando capas más profundas, almacenándose en el entorno de las raíces (Martínez-Mesa, 1996; Dunkerley, 1999). De esta forma las plantas tienen un recurso importante de agua y nutrientes (Tromble, 1988; de Soyza, 2002). Carlyle-Moses, 2004 afirma que esta redistribución de la precipitación puede tener mucha importancia para las plantas de clima semiárido.

Por otra parte, el agua durante su tránsito por la copa, se carga de minerales, especialmente en climas semiáridos donde la escasez de precipitaciones, la existencia de suelo desnudo y el viento, favorecen la retención de polvo en la copa. Este enriquecimiento cambia la química del agua y constituye un aporte de minerales al suelo (Domingo *et al*., 1994).

Para el cálculo de los aportes iónicos por escorrentía cortical, tuvimos en cuenta como se menciono en el capítulo cinco, la estructura y distribución de individuos. Hemos comprobado que la concentración de los iones, depende del diámetro del tronco ($p<0.05$), por lo que el cálculo de la concentración promedio que llega al suelo debe estar ponderada por el volumen de agua que canaliza, y por el número de árboles pertenecientes a cada clase diamétrica.

Si imaginamos una hectárea del sistema dunar con la vegetación repartida con los porcentajes de cobertura dados para cada especie, y aplicando los porcentajes de escorrentía cortical en que se transforma la precipitación hallados para cada especie, observamos en la tabla 39 que de los aproximadamente 5,32 Dm^3/ha de agua que caerían en ella, 460 m^3/ha escurrirían por *Pinus halepensis Miller* y 370m^3/ha lo harían por *Pinus pinea* L. En total llegarían al suelo en todo el periodo de estudio 0,83 Dm^3/ha.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Especies	% Ec	% Cobertura	Volumen que llega al suelo/ha en Dm3
P.halepensis Miller	17,30	50,00	0,46
P.pinea L	15,45	45,00	0,37

Tabla 39. Volúmenes aportados por escorrentía cortical en las dos especies estudiadas

La tabla 40 contiene los aportes brutos por hectárea, en la que se han tenido en cuenta la densidad de individuos por clases diamétricas y con el volumen total de escurrimiento recogido para cada árbol. Estos serían los aportes de cada especie en concreto. Los volúmenes utilizados para éste cálculo los utilizamos bajo la hipótesis de que los porcentajes dados de precipitación que escurre son válidos para todas las clases diamétricas, extremo erróneo ya que hemos comprobado que existe una dependencia del volumen de escorrentía cortical con el diámetro basal. Sin embargo nuestro interés es estimar a escala general ese aporte.

	Kg/ha						
Especies	**Ca 2+**	**Mg 2+**	**K +**	**Na +**	**Cl -**	**(N03)-**	**(S04)2-**
Pinus.pinea L	3,40	0,71	1,26	3,07	4,56	0,65	3,56
Pinus.halepensis Miller	2,58	0,51	0,97	2,14	3,31	0,43	2,68
Total	5,98	1,22	2,24	5,21	7,86	1,08	6,24

Tabla 40. Aportes del flujo de escorrentía cortical (Kg/ha) durante todo el periodo de estudio.

En este flujo los cationes calcio con 5,98 Kg/ha y sodio con 5,21 Kg/ha y los aniones cloruro con 7,86 Kg/ha y sulfato con 6,24 Kg/ha, son los iones más aportados al suelo dunar de Guardamar del Segura, Estos mismos iones eran también los más aportados en el flujo de la trascolación.

Comparando los aportes al suelo por el efecto de la vegetación presente en el ecosistema dunar, con los obtenidos en la deposición global, vemos que son muy inferiores (figura 106), pero hemos de tener en cuenta que los aportes de escorrentía cortical afectan a un área muy reducida y localizada alrededor del tronco (Watters y Price, 1988).

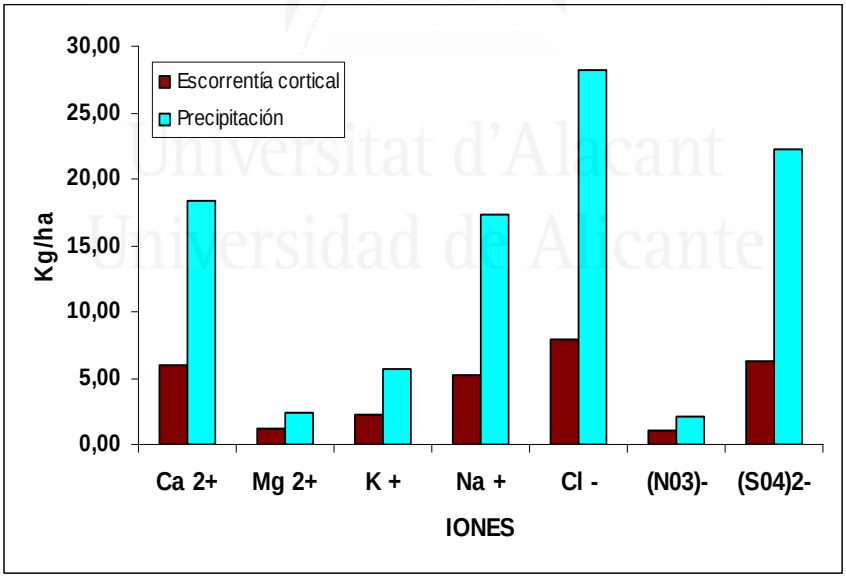


Figura 106. Aportes en Kg/ha de la deposición global y la escorrentía cortical durante todo el periodo de estudio.

Comparando los tres aportes al suelo (figura 107) durante todo el periodo de estudio en el ecosistema dunar y obtenidos en los apartados anteriores, vemos que las contribuciones por deposición global son mayores en unos iones (sodio, cloruro y

sulfato) a la de trascolación y menores en calcio, magnesio, potasio y nitratos, sin embargo muy superiores a la de escorrentía cortical, pero hemos de tener en cuenta que la Ec afecta un área muy reducida y localizada alrededor del árbol. También es importante señalar que si sumamos las aportaciones por Tr y Ec estas son superiores a la DG corroborando de cierta manera el papel fundamental que tiene la vegetación en la captación de nutrientes.

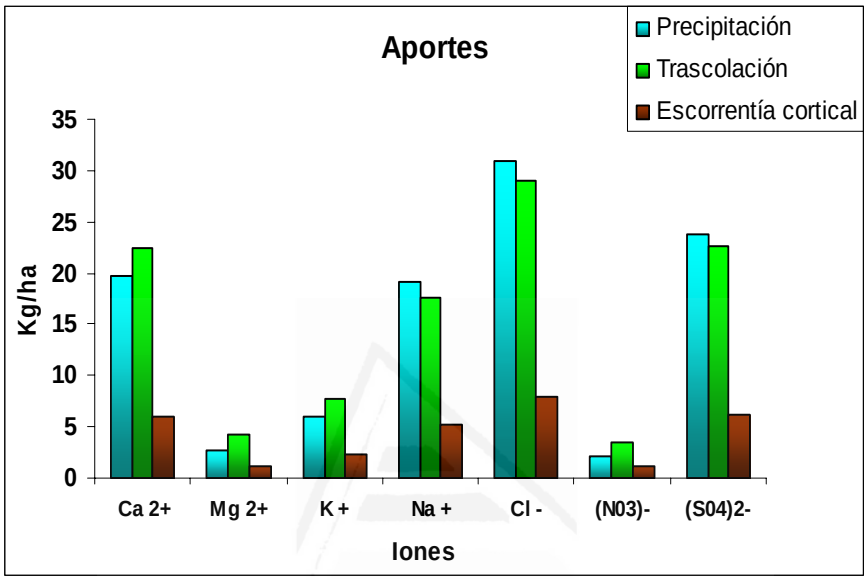


Figura 107. Aportes en Kg/ha de la deposición global, trascolación y la escorrentía cortical durante todo el periodo de estudio.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

De lo anterior se puede comentar que la arquitectura de la copa es parte de las adaptaciones que sufren las especies que intentan superar las restricciones impuestas por el ambiente. Estas adaptaciones afectan también al reparto de la lluvia y nutrientes. En plantas de clima árido entre un 20 y un 40% de la precipitación puede ser conducido vía escorrentía cortical (Martínez-Meza y Whitford, 1996; Mauchamp y Janeau, 1993; Pressland, 1973; Pressland, 1979; Slatyer, 1965). Este porcentaje es bastante elevado si se compara con otro tipo de especies. El manejo de la distribución de lluvia permite a la planta un cierto control del agua almacenada y de su disponibilidad (Puigdefábregas y Pugnaire, 1999).

8.4. DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD EN EL ECOSISTEMA DUNAR

La falta de agua en ecosistemas mediterráneos es el factor limitante del crecimiento y estabilidad de la vegetación (De Simón 1990; Gil y Prada, 1993; Alloza y Vallejo, 1999 y Zamora *et al*., 2001) convirtiéndose en un recurso vital y valioso para procesos ecofisiológicos. No cabe duda de que en un ecosistema como el dunar de Guardamar del Segura, el agua de lluvia por sí sola no satisface las necesidades de las plantas. Por lo tanto existen otras "reservas" y formas de acceder a la humedad por estas especies, permitiendo de alguna manera sobrevivir a condiciones tan hostiles.

Apoyados en dos técnicas geofísicas no agresivas por una parte los sondeos eléctricos verticales y por otra el georradar de subsuelo, hemos pretendido comprobar en primer lugar cual es la distribución vertical de la humedad en el suelo dunar, con el objeto de conocer las reservas de agua en épocas estivales. Así mismo conocer por medio de la técnica del GPR la distribución y profundidades que alcanzan las raíces en este bioma y poder determinar en la medida de lo posible las estrategias de adaptabilidad de *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L en este tipo de ambientes.

Los sondeos eléctricos verticales muestran resultados bastante interesantes, señalando la existencia de una capa con buen contenido de humedad, de espesores entre 0.75 a 3.5 m a lo largo del ecosistema y con resistividades que oscilan entre 8,2 Ohm.m y 47,6 Ohm.m según se observa en la figura 108. Estos contenidos de humedad coinciden en la mayoría de casos a los encontrados por Garcia, 2005 quien hizo un seguimiento durante mas de dos años del contenido volumétrico de agua (CVA) en el suelo, encontrando que el promedio de contenido de humedad en el sustrato en el periodo de la primavera no era diferente del encontrado en el invierno y que este contenido variaba muy poco en las estaciones de otoño y verano. Este autor también señala que el 77% de su contenido volumétrico de agua (CVA) estaba localizado en los 60 y 100 cm de profundidad y el resto, 23% de toda esta humedad esta localizado en el nivel superior.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

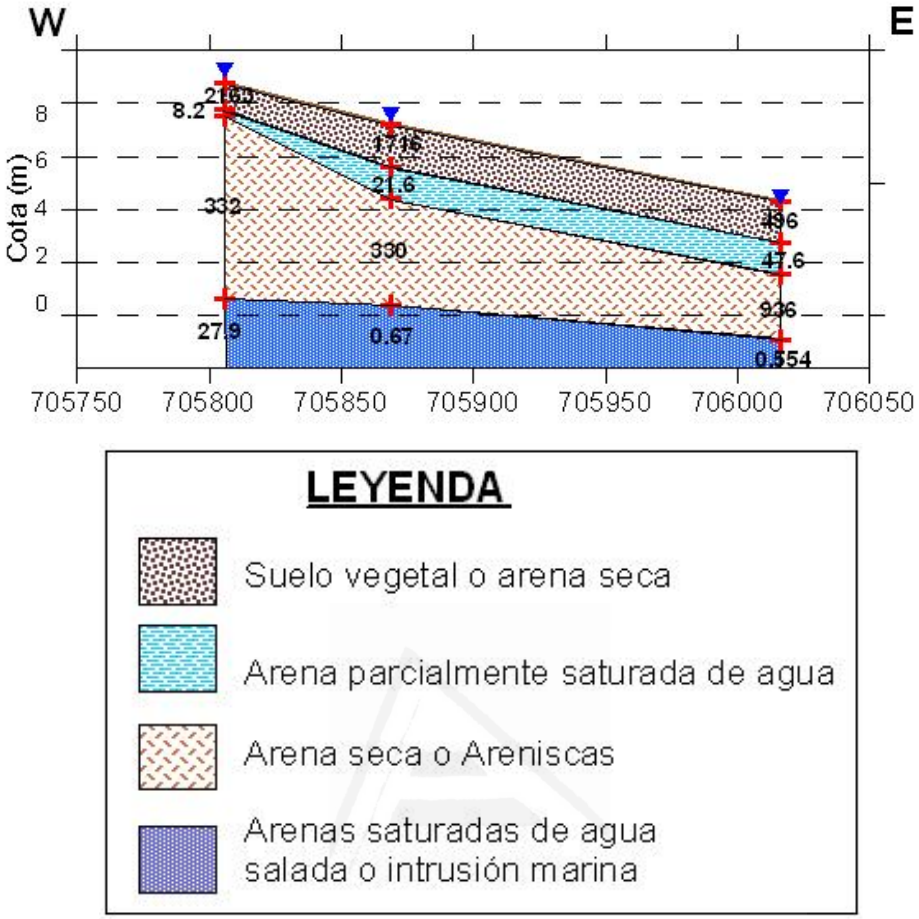


Figura 108. Distribución vertical de resistividades y humedad del suelo dunar de Guardamar del Segura.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

8.5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL SISTEMA RADICULAR DEL ECOSISTEMA DUNAR CON METODOS NO INVASIVOS (GPR).

La fracción subterránea, mucho menos conocida que la fracción aérea, es un componente funcional muy importante del árbol que puede representar más de la mitad de la biomasa total (Gracia *et al*., 2004). A pesar de su importancia, hay escasa información sobre la distribución y profundidades que pueden alcanzar y el papel que pueden cumplir estas en la captación de agua y nutrientes en los sistemas dunares costeros.

De los resultados ofrecidos por el GPR resulta evidente e importante observar el comportamiento subterráneo de las dos especies dominantes del ecosistema y establecer

de alguna manera su relación con los contenidos de humedad encontrados por la técnica eléctrica.

Históricamente, la principal dificultad en el estudio de las raíces, como indica Gracia *et al*., 2004 es que resulta imposible estudiarlas directamente en el suelo. Las metodologías convencionales para el estudio del comportamiento del sistema radicular son: a) Método de extracción el cual requiere tomar volúmenes conocidos de suelo mecánica o manualmente, luego se separan cuidadosamente las raíces y el material vegetal. Dentro de este método hacen parte los monolitos (el cual requiere un volumen mayor de suelo). b) Método de observación, estos son los preferidos para estimar la dinámica de las raíces. Estos métodos permiten la observación secuencial de las mismas raíces a través de ventanas de vidrio u de otros materiales transparentes, convirtiéndose por lo general en experimentos solo a nivel de laboratorio. Como vemos son técnicas de campo y laboratorio que demandan enormes cantidades de tiempo y a su vez resultan ser muy agresivas y destructivas.

El GPR es una herramienta geofísica que nos ofrece la posibilidad de estudiarlas con precisión, siempre y cuando se hagan calibraciones y se valide con datos experimentales, a su vez se convierte en un método no invasivo que no genera impactos ambientales considerables en ecosistemas tan frágiles como los dunares.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Esta técnica mostró que la distribución de las raíces en el ecosistema dunar se encuentra a profundidades no mayores de 80 cm, como se evidencia en los diferentes registros de GPR en el capitulo VII y en los desenterramientos realizados en las dos clases de pino (figura 109). Las dos especies desarrollan un sistema radicular muy superficial, creando una especie de "malla", con raíces finas (menores a 2,5 mm). Este comportamiento ha sido similar tanto en *Pinus pinea* L y *Pinus halepensis* Miller. Garcia, 2005 en un perfil perpendicular a la costa en este mismo bioma encontró que no existen diferencias del sistema radicular de las dos especies mencionadas anteriormente.

Estas particularidades del sistema radicular observadas tanto por el GPR como por los distintos desenterramientos, nos permiten suponer que al igual que muchas especies mediterráneas, el *Pinus halepensis* Miller y el *Pinus pinea* L, posee características adaptativas que les permiten sobrevivir a periodos prolongados de sequía y los escasos

nutrientes que llegan al ecosistema por los diferentes flujos. Todas estas evidencias nos ha puesto a pensar por una parte que las dos especies de pino aprovechan el rocío (fuente de iones de potasio, sodio, calcio y magnesio) para mantener su supervivencia en épocas estivales y por otro lado se beneficiarían de esos nutrientes.

Figura 109. Distribución en profundidad de las raíces de las especies arbóreas estudiadas en las dunas de Guardamar del Segura.

El crecimiento de las plantas que habitan en las zonas semiáridas y áridas tiene como principal limitante la escasez de agua (Gutiérrez, 2001). Esta baja reserva de agua afecta directamente a características fundamentales en su desarrollo (intercambio de gases, interacción entre especies, productividad y la estructura de la comunidad) (Ehleringer y Mooney 1983; Arroyo *et al*., 1988; Radà *et al*., 1999; Squeo *et al*., 2000). Por ello, las especies vegetales de este tipo de ecosistemas optimizan la utilización de las fuentes de agua desarrollando diferentes estrategias para su provecho, las que estarían relacionadas directamente con las formas de sus sistemas radiculares. Ehleringer *et al*., (1991)

muestran que como algunas especies leñosas con raíces profundas presentan baja habilidad para utilizar agua desde las capas superficiales del suelo, otras especies como las herbáceas poseen sistema radicular superficial pudiendo usar esta fuente de humedad para su crecimiento y reproducción.

Para algunas plantas les es propicio poseer raíces superficiales, las que les permitirían aprovechar las precipitaciones, el agua aportada por las neblinas, el rocío y serían responsables de la adquisición de nutrientes (Caldwell *et al*., 1990; Lynch, 1995 y Steudle, 2001). Las plantas que poseen raíces profundas son capaces de explorar y extraer fuentes de agua subterránea durante los períodos de sequía. Entre éstas últimas, las especies que poseen raíces laterales que exploran las capas superficiales ricas en nutrientes durante la estación húmeda y la raíz principal es la que obtiene agua subterránea durante los períodos secos (Ehleringer *et al.,* 1991 y Caldwell *et al*., 1998).

Algunas especies vegetales tienen diferentes estrategias para captar el agua. Es así como en un estudio de la utilización de la humedad del suelo por el pino blanco (*Pinus strobus*) realizadas con isótopos en el Este de Estados Unidos, White *et al*., (1985) mostraron que la extracción de agua por esta especie cambiaba, unas veces esta utilizaba la humedad de las capas superficiales y en otras la humedad de capas profundas del suelo.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Son varios los trabajos que han documentado estos cambios estaciónales de las fuentes de agua que utilizan especies leñosas, mientras que otras especies mantienen invariante su fuente de agua, obteniéndola desde cotas más profundas del suelo durante todo el año (Flanagan y Ehleringer 1991; Ehleringer y Cook 1991; Flanagan *et al*., 1992; Valentini *et al*., 1992; Williams y Ehleringer 2000; Schwinning y Ehleringer 2001; Schwinning *et al*., 2002).

En general estas dos técnicas (S.E.V y GPR) han sido herramientas fundamentales para aclarar algunos interrogantes planteados respecto a la relación nivel freático-raíz, es decir como y de donde pueden las especies arbóreas como el *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L obtener el agua y nutrientes y que estrategias emplean las dos especies para satisfacer estos requerimientos, en un medio donde los elementos esenciales son limitados.

8.6. CONCLUSIONES

- Los aportes anuales de nutrientes en la precipitación del ecosistema dunar de Guardamar del Segura tienen como iones mayoritarios el cloruro que contribuye con 19 Kg/ha, seguido del sulfato con 13,10 Kg/ha, posteriormente aparecen el sodio con 12,56 Kg/ha y el calcio con 10,73 Kg/ha. Las contribuciones minoritarias son de los iones nitrato con 1,18 Kg/ha, seguido de magnesio con 1,51 Kg/ha y del potasio con 3,89 Kg/ha.

- Los mayores aportes recibidos en el flujo de la trascolación por *Pinus pinea* L los presenta los iones cloruro con 15,52 Kg/ha, sulfato con 12,05 Kg/ha y el calcio que representa unos 12 Kg/ha. En *Pinus halepensis* Miller en la trascolación aporto 13,43 Kg/ha de cloruro, 10,49 Kg/ha de calcio y 10,48 Kg/ha de sulfatos.

- Los aportes máximos recibidos por la escorrentía cortical en las dos especies estudiadas en el ecosistema dunar de Guardamar del Segura muestran que el cloruro contribuye con 7,86 Kg/ha, seguido del sulfato con 6,24 Kg/ha, posteriormente aparece el calcio con 5,98 Kg/ha y en último lugar surge el nitrato con 1,08 Kg/ha.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

- Los Sondeos Eléctricos Verticales realizados en épocas estivales señalan la existencia de una capa con resistividades entre 8,2 Ohm.m y 47,6 Ohm.m, zona que posee los más altos contenidos de humedad en el bioma.

- La zona de mayor humedad encontrada con la eléctrica (S.E.V) coincide con la máxima densidad de raíces visualizadas con el GPR de las dos especies arbóreas dominantes del ecosistema dunar.

CAPÍTULO IX
CONCLUSIONES GENERALES

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

9. CONCLUSIONES GENERALES

- En los dos años de estudio se recogieron un total de 532 mm de precipitación, caracterizada por la alta carga iónica con elevada variación temporal.

- En la precipitación de Guardamar del Segura el orden secuencial de los iones analizados es el siguiente: $Ca^{2+} > Cl^{-} > Na^{+} > S04^{=} > Mg^{2+} > N03^{-} > K^{+}$.

- La cantidad de precipitación es el factor determinante en los flujos de trascolación y escorrentía cortical, asimismo la intensidad y la duración tienen efectos sobre los volúmenes.

- El agua lluvia al ponerse en contacto con la masa forestal del ecosistema dunar de Guardamar del Segura enriquece todos los iones analizados.

- Por medio de la precipitación durante el periodo de investigación llegaron al suelo dunar 30,9 Kg/ha de cloruro, 23,77 Kg/ha de sulfato, 19,65 Kg/ha de calcio, 19,24 Kg/ha de sodio, 6,06 Kg/ha de potasio, 2,67 Kg/ha de magnesio y 2,18 Kg/ha de nitratos.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

- La trascolación en los pinos del ecosistema dunar de Guardamar del Segura sólo se da en precipitaciones superiores a 3.2 mm.

- Las especies arbóreas dominantes del sistema dunar de Guardamar del Segura dan altos porcentajes medios de trascolación 69 % de la precipitación para *Pinus halepensis* Miller y 65 % para *Pinus pinea* L.

- En términos generales, la química de la trascolación esta dominada por el calcio, cloruro, sodio. En tanto que los iones menos representativos son el nitrato y potasio.

- Las tasas de enriquecimiento medio de la trascolación muestran que los nitratos, magnesio y potasio son los iones que más incrementan su concentración en las dos especies estudiadas.

- La trascolación durante el periodo de muestreo aportó 28,95 Kg/ha de cloruro, seguido de sulfato con 22,53 Kg/ha, luego aparece el calcio con 22,50 Kg/ha y en el último lugar aparece el nitrato con 3,51 Kg/ha.

- La cantidad de escorrentía cortical de las dos especies de pino estudiadas varía en función del diámetro del tronco del árbol y del volumen de precipitación.

- El flujo de escorrentía cortical presentó, un porcentaje pequeño del total de precipitación durante el periodo de muestreo. La especie que mayor escurrimiento fustal presenta es Pinus halepensis Miller con un 17% y la de menor escorrentía cortical fue Pinus pinea L con un 15% del total de la precipitación.

- La carga iónica total, obtenida en la escorrentía cortical es superior en las dos especies de pino estudiadas, a la de los flujos de deposición global y trascolación.

- El estudio de la química de los flujos hídricos del pinar muestra tasas de enriquecimiento positivas en los dos flujos, siendo mayores significativamente en la escorrentía cortical.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

- La escorrentía cortical aportó durante el periodo de investigación 7,86 Kg/ha de cloruro, 6,24 Kg/ha de sulfatos, 5,98 Kg/ha de calcio, 5,21 Kg/ha de sodio, 2,24 Kg/ha de potasio, 1,22 Kg/ha de magnesio y 1,08 Kg/ha de nitratos.

- Comparando las contribuciones al suelo dunar, observamos que la escorrentía cortical es el flujo que menor aporte hace el ecosistema, pero hemos de tener en cuenta que esta sólo afecta a un área muy reducida y localizada alrededor del tronco.

- Los sondeos mecánicos nos permitieron por una parte parametrizar los sondeos eléctricos verticales y por otra conocer las profundidades a las que se encuentra el nivel freático en el ecosistema dunar.

- Con los sondeos eléctricos verticales se han detectado cuatro capas con diferentes resistividades, la primera y más superficial caracterizada por suelo vegetal y/o arenas muy secas con espesores entre 0,75 y 1,18 m. La segunda asociada a arenas parcialmente saturadas de agua con espesores entre 0,75 a 1,46 m. La tercera representada por arenas secas con espesores que oscilan entre 4,25 y 23,7 m y una cuarta capa caracterizada por arenas saturadas de agua salada.

- Se ha validado el uso de la técnica del GPR para el estudio del sistema radicular del ecosistema dunar.

- La antena de 100 MHz permite alcanzar, en este tipo de ambientes, profundidades de investigación de hasta 10 m y detecta raíces con un diámetro igual o mayor de 2,5 cm. La de 500 MHz penetra a profundidades entre 1,50 y 2 m, permitiendo detectar raíces del orden de 1 cm. Con la antena de 1000 MHz se pueden estudiar en los 50 cm más superficiales diámetros de raíces mayores o iguales a 1 cm pero con una resolución mayor que con la antena de 500 MHz.

- La utilización de la antena de 500 MHz con una frecuencia de muestreo de 18000 MHz es la que mejores resultados han proporcionado.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

- Con los parámetros anteriores se ha localizado una intensa red de raíces horizontales que se localizan casi exclusivamente a nivel superficial no superando los 80 cm de profundidad.

- Las dos técnicas geofísicas empleadas en esta investigación han sido fundamentales para entender más y mejor el funcionamiento del ecosistema dunar, específicamente en la distribución de humedad y sistema radicular de las dos especies de pino estudiadas.

- Según los resultados obtenidos a lo largo de la investigación y apoyados en dos técnicas no agresivas se puede concluir que las dos especies de pinos, pueden estar aprovechando recursos hídricos y nutrientes superficiales para poder sobrevivir.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAPÍTULO X
BIBLIOGRAFÍA

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1O. BIBLIOGRAFÍA.

ABEE, A. y LAVENDER, D. 1972. Nutrient cycling in throughfall and litterfall in 450 year-old Douglas Fir stands. En: *Research on Coniferous Forest Ecosystems First Year Progress in the Coniferous Forest Biome*. (Eds. Frankling, J.F., Dempster, L.J. y Waring, R.H.) p. 133-143. Northwest Scientific Associattion. Pacific. Northwest Forest Experiment Station. Forest Service. USDA. Portland, Oregon.

ABOAL, J.R., JIMÉNEZ, M.S., MORALES, D., GIL, P. 2000. Effects of thinning on throughfall in Canary Islands pine fores-the role of fog. *Journal of Hydrology,* 238: 218–230.

ABOAL, J.R., MORALES, D., HERNÁNDEZ, M. y JIMÉNEZ, M.S. 1999. The measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. *Journal of Hydrology*, 221: 161-175.

ADAMS, C.M. y HUTCHINSON, T.C. 1987. Comparative abilities of leaf surfaces to neutralize acid raindrops II. The influence of leaf wettability, leaf age and rain duration on changes in droplet pH and chemistry on leaf surfaces. *New Phytol*. 106: 437-456.

ALDEGUER, M. 1989. Dinámica litoral y génesis dunar. En: Escarré A, Martín, J y Seva, E. (eds.) *Estudios sobre el medio y la biocenosis en los arenales costeros de la Provincia de Alicante*, cap III, pp. 27-42. Diputación Provincial de Alicante.

ALDEGUER, M. y SEVA, E. 1989. Agresiones al medio dunar, propuestas de ordenación. En: Escarré A, Martín, J y Seva, E. (eds.) *Estudios sobre el medio y la biocenosis en los arenales costeros de la Provincia de Alicante*, cap XI, pp. 111-123. Diputación Provincial de Alicante.

ALLOZA, J.A. y VALLEJO, R. 1999. Relación entre las características metereológicas del año de plantación y los resultados de las repoblaciones. *Ecología*, 13: 173-187.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ANDERSEN, H.V., HOVMAND, M.F., HUMMELSHOJ, P., JENSEN, N.O., 1993. Measurement of ammonia flux to a spruce stand in Denmark. *Atmospheric Environment* 27: 189–202.

ANNAN, A.P. y J.P. DAVIS, 1976. Impulse Radar Soundig in Permafrost. *Radio Science*, 11 (4): 383-394.

ARAGÓN, R., MORA, V. y RODRIGUEZ, T. 1992. *Contribución al conocimiento de las demandas y usos del agua en el Campo de Cartagena*. V Simposio de Hidrogeología. A.E.H.S. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Tomo XV: 495-507. A.E.H.S. Diputación Provincial de Alicante. Alicante.

ARROYO, M.T.K., SQUEO, F.A., ARMESTO, J. y VILLAGRÁN, C. 1988. Effects of aridity on plant diversity in the northern Chile Andes. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 75: 55-78.

ASENSI, A. y DÍEZ, B. 1983. Dry coastal ecosystems of Southeastern and Eastern Spain. En: Van der Maarel E (eds.) *Ecosystems of the world*, 2A, cap. 22 Elseiver Scientific Publishing Company.

AUSSENAC, G., 1970. Action du couvert forestier sur distribution ausol des precipitations. *Annals. Science. Forest.*, 27(4): 383-399.

AVILA, A. 1987. Balanc d´aigua i nutrients en una conca d´alcinar al Montseny. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

AVILA, A. 1996. Time trends in the precipitation chemistry at a mountain site in north-eastern Spain for the period 1983–1994. *Atmospheric Environment* 30: 1363–1373.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

AVILA, A. y ALARCON, M. 1999. Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain. *Atmospheric Environment* 33: 1663–1677.

AVILA, A. y RODÀ, F. 1991. Red rains as major contribution of nutrients and alkalinity to terrestrial ecosystems at Montseny (NE Spain). *Orsis* 6, 215-229.

BAGNOLD, R.A 1941. *The physics of blown sand and desert dunes.* Methuen, Londres, 265 pp.

BARBOUR, M.G., DE JONG, T.M. y PAVLIK, B.M. 1985. Marine beach and dune plant communities. En: Chabot, B.F. y Mooney, H.A. (eds.) *Physiological ecology of North American plant communities*. Chapman y Hall, New York, pp. 296-322.

BAUER, B.D y SHERMAN, D.J. 1999. Coastal dune dynamics: problems and prospects; En: GOUDIE, A.S., LIVINGSTONE, I. Y STOKES, S. (eds). *Aeolian environmens, sediments and landforms*; John and sons, London: 71-104.

BEE, A. y LAVENDER, D. 1972. Nutrient cycling in throughfall and litterfall in 450 year-old Duglas fir satand. En: Franklin, J.F; Dempster, L.J. y Waring, R.H.(eds) *Research on Coniferous Forest Ecosystem First Year Progress Biome.* pp. 133-143. US/IBP, Proc. Symp. Northwest Scientific Association. Pacific Northwest Forest Experiment Station. Forest Service. USDA. Portland, Oregon.

BELMONTE, S.F. y ROMERO, D.A. 1993. Instrumentos y métodos para el estudio de la capacidad de interceptación de algunas especies vegetales mediterráneas “El Ardal” (Murcia). *Nuevos Procesos Territoriales*, AGE, Sevilla, 181-185.

BELMONTE SERRATO, F. Y ROMERO D. A. 1994. Distribución de flujos de agua en el proceso de interceptación en cuatro especies vegetales mediterráneas y su relación con la cantidad de agua disponible en el suelo. En: *Geomorfología en España*. Arnáez, J., García

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Ruiz, J. M. & Gómez Villar, A. (Eds.), Logroño. Sociedad Española de Geomorfología, 201-210 pp.

BELLOT, J. 1989. Análisis de los flujos de deposición global, trascolación, escorrentía cortical Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

BELLOT, J. y ESCARRE, A. 1988. Balances de nutrientes en pequeñas cuencas de encinar. *Mediterránea Ser. Biol.* 10:63-85.

BELLOT, J. y ESCARRE, A. 1989. Efecto del estado del desarrollo del bosque mediterráneo sobre la distribución del agua lluvia y nutrientes en el suelo forestal. *Options medtiterraneennes Serie Séminaires* 3: 221-225.

BELLOT, J. y ESCARRE, A. 1991. Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in mediterranean holm oak forest. *Forest Ecology and Management*, 41(1):125-135

BELLOT, J. y ESCARRE, A. 1991. Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in Mediterranean holm oak forest. *For Ecol Manage*, 41:125 –135.

BELLOT, J., ÁVILA, A., Y RODRIGO, A. 1999. Throughfall and stemflow. In *Ecology of Mediterranean evergreen oak forest. Ecological Studies*, Vol. 137. Rodá, F., Retana, J., Gracia, C. y Bellot, J. (Eds.). Berlin. 209-222 pp.

BERNABÉ, P. A. 2004. Caracterización de plantas psamófilas, aproximación a sus tipos funcionales, y ensayos de restauración en dunas del litoral Alicantino. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

BLISS, L.C. 1993. Artic coastal ecosistems. En: Goodall, D.W. y Van Der Maarel, E. (eds.), Ecosystem of the world: Dry coastal ecosystems. Elsevier Scientific Publishing Company., 2a: 15-22.

BORING, L.R., SWANK, W.T. y HENDERSON, G.S. 1988. *Sources, fates and impacts of nitrogen inputs to terrestrial ecosystem: Review and Synthesis*. Biogeochemistry.

BORÓWKA, R.K. 1980. *Present day dune proccesses and dune morphology on the Leba barier, Polish Baltic coast.* Geografiska Annaler Series, A, 62: 75-82.

BRIDGMAN, H.A. 1992. Evaluating rainwater contamination and sources in southeast Australia using factor analis. *Atmospheric Environment* 26A, 13, 2401-2412.

BRINSON, M.M., BRADSHAW, H.D., HOLMES, R.N. y ELKINS, J.B. 1980. Litterfall stemflow and throughfall nutrient fluxes in aluvial swamp forest. *Ecology*. 61: 827-835.

BUTNOR, J. R., DOOLITTLE, J. A., KRESS, L., COHEN, S. y JOHNSEN, K. H. 2001. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *journal Tree Physiology* 21, 1269–1278.

CALDWELL, M.M y RICHARDS, J.H 1990. Competing roots systems: morphology and models of absorption. En: Givnish TJ (ed) *On the economy of plant form and function*: 251-273. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

CALDWELL, M.M., DAWSON, T.E y RICHARDS, J.H. 1998. Hydraulic lift: consequences of water effux from the roots of plants. Oecologia 131: 151-161.

CALVO DE ANTA, R.M., PAZ, A. y DÍAS-FIERROS, F. 1979. Nuevos datos sobre la influencia de la vegetación en la formación de suelo en Galicia. II. Aportes de elementos por lavado de cubierta y tronco. Annal. Edafología. Agrobiología. 38, pp 1675-1961.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CAMARERO, L. y CATALAN, J. 1993. Chemistry of bulk precipitation in the Central and Eastern Pyrenees, Northeast Spain. *Atmospheric Environment*, 27A (1), 83–94.

CAMUFFO, D., BERNARDI, A. y BACCI, P. 1991. Transboudary trasnspor of Atmospheric pollutants throuhg the Eastern Alps. *Atmospheric Environment*. 25(12), 2863-2871.

CANTÚ, I S. y GONZÁLEZ, R.H. 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology* 21, 1009–1013.

CARCIONE, J.M., 1996. Ground radar simulation for archaeological application. *Geophysical Prospecting*, 44: 871-888.

CARLISLE, A., BROWN, A.H.F. y WHITE, E.J. 1966. The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessible oak (*Quercus petrea*) woodland canopy *Journal. Ecology*, 54: 87-98.

CARLISLE, A., BROWN, A.H.F. y WHITE, E.J. 1967. The nutrient content of tree stem flow and ground flora litter and leachates in a sessible oak (*Quercus petrea*) woodland. *Journal. Ecology*, 55: 615-627.

CARLYLE-MOSES, D.E. 2004. Throughfall, stemflow and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 58:181-202.

CARRATALÁ, A., BELLOT, J., GÓMEZ, A. y MILLÁN, M. 1996. African dust influence on rainwater on the eastern coast of Spain. En: Guerzoni S y Chester R (eds), *Desert Dust Across the Mediterranean*. Kluwer Academic Publisher, London, pp. 323–332..

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CARRATALÁ, A. 1993. Caracterización de la química de la precipitación en la Comunidad Valenciana. Distribución Espacial y Temporal. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

CARRATALÁ, A. y BELLOT, J. 1998. Neutralisation of sulfate and nitrate in precipitation on the Eastern Mediterranean Coast of Spain. Implications for acidification risk. *Water, Air and Soil Pollution*, 104 (3–4), 237–257.

CARTER, R.W.G. 1995. *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines*. 5th ed. Academic press, London.

CASADO, H., ENCINAS, D. y LACAUX, J.P. 1996. Relationship between the atmospheric particulate fraction and the ionic content of precipitation in an area under influence of a waste incinerator located in the Basque Country (Spain). *Atmospheric Environment*, 30(10–11), 1537–1542.

CASADO, H., ENCINAS, D., LACAUX, M., 1992. The moderating effect of calcium on the acidity in precipitation. *Atmospheric Environment*, 26A (6), 1175.

CLAVERO, P.L. 1994. Tipus de clima, En: *Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana* (1961-1990), Generalitat Valenciana, Conselleria d´Obres Publiques, Urbanismo i Transport (Eds.), pp. 118-121.

CLEMENTS, R.G. y COLON, J.A. 1975. The rainfall interception process and mineral cycling in a montane rain forest in eastern Puerto Rico. In Howell, F.G., Gentry, J.B. y Smith, M.H. (Eds.). *Mineral cycling in southeastern ecosystem*. Technical Information Center, U.S.Energy Research and Development Administration.

COSTA M, STÜBING G y PERIS JB. 1989. Vegetación litoral y continental. En: *Guía de la Naturaleza de la Comunidad valenciana*. Levante. Valencia.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

CRAWFORD, R. M. M. 1989. *Studies in plant survival*. Blackwell scientific publications. Oxford 256 pp.

CRAWFORD, R. M. M. 1989. Survival in coastal habitats. En: Crawford, R. M. M. (Eds.), Studies in plant survival: *ecological case histories of plant adaptation to adversity*. Blackwell, Oxford, 135-157.

CRAWLEY, J. y SIEVERING, H. 1986. Factor analysis of the MAP3S raine precipitation chemistry network: 1976-1980 *Atmospheric Environment*. 20(5): 1001-1013.

CROCKFORD, R. H; RICHARDSON, D. P. 1990. Partitioning of rainfall in a eucalypt forest and pine plantation in Southeastern Australia: IV. The relationship of interception and canopy storage.

CRONAN, C.S. y REINERS, W.A. 1983. Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. *Oecologia*. 59. 216-223.

CUSTODIO, E. 1983. *Nuevas contribuciones al conocimiento hidrogeológico de las Islas Canarias.* Madrid, en: Proc. III Symp. Hydrogeology. Hidrogeología y recursos hidráulicos, vol. I, pgs. 705-707.

CUSTODIO, E.y LLAMAS, M.R. 1983. *Hidrología subterránea*. Eds. Omega, Barcelona.

CHAPIN, F. S., MATSON, P.A y MOONEY, H.A. 2002. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer, Nueva York.

CHAPMAN, G. 1948. *Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation.* Transaction of the American Geophysical Union, 29 (5): 664-660.

CHESTER, R., NIMMO, M. y KEYSE, S. 1996. The influence of Saharan an Middle Eastern desert-derived dust on the trace metal composition of Mediterranean aerosols an

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

rain-waters: an overview. In: Guerzoni y R. Chester (eds) *The Impact of African Dust Across the mediterranean*. Kluwer. Dordrecht. P. 253-273.

CHIRINO, E. 2003. Influencias de las precipitaciones y de la cubierta vegetal en el balance hídrico superficial y en la recarga de acuíferos en clima semiárido. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

CHUNG, T., CARTER, C.R., MASLIWEC, T. y MANNING, D.G. 1994. Impulse radar evaluation of concrete, asphalt and waterproofing membrane. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 30 (2): 404-415.

CHUYONG, G.B., NEWBERRY, D.M. y SONGWE, N.C. 2004. Rainfall input throughfall and stemflow of nutrients in central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *Biochemistry*,67: 73-91, 2001.

DASCH, J.M. 1987. Measurement of dry deposition to surfaces in deciduous and pine canopies. *Eviromental Pollution*, 44. 261-277.

DAVIES, J.L. 1980. *Geomorphological variation in coastal development*; Logman, Nueva York, 212 pp.

DE LUIS, M., RAVENTOS, J., GONZALEZ HIDALGO, J.C., SANCHEZ, J.R. y CORTINA, J. 2000. Spatial analysis of rainfall trends: a case study in Valencia Región (E Spain). *International Journal of Climatology*, 20. 1451-1469.

DE SIMÓN, E. 1990. *Restauración de la vegetación en cuencas mediterráneas: Repoblaciones en zonas áridas*. Ecología, Fuera de serie nº 1, pp 401-427. ICONA, Madrid.

DE SOYZA, A.G., WHITFORD, W.G., MARTÍNEZ-MEZA, E. y VAN ZEE, J.W. 2002. Variation in Creosotebush (Larrea tridentata) canopy morphology in relation to habitat, soil

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

fertility and associated annual plant communities. American Midland Naturalist, 137 (1): 13-26.

DIAZ-CANEJA N., BONET A., GUTIERREZ I., MARTINEZ A. y VILLAR E. (1989). The chemical composition of rainfall in a city Northern Spain *Water Air Soil Pollution*, 43, 277-291.

DOMINGO, F., PUIGDEFÁBREGAS, J., MORO M.J., y BELLOT, J. 1994. Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small afforested catchment in southeastern Spain. *Journal of Hydrology*, 159: 275 - 289.

DOMINGO, P.F. 1991. Papel de la cubierta vegetal en los aportes de nutrientes y salidas por avenamiento en una cuenca reforestada con coniferas en la Sierra de Filabres (Almería). Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

DUNKERLEY, D.L. y BOOTH, T.L. 1999. Plant canopy interception of rainfall and its significance in a banded landscape, arid western New South Wales, Australia. *Water Resources Research*, 35 (5): 1581-1586.

DURAN, P., COLIN, N. y LELONG, F. 1992. Anthopogenic and natural contributions to the rain chemistry of a moutainous area in Cevennes National Park (Mont-Lozere) France, *Journal of hydrology*, 130: 71-85.

DUYSINGS, J.J.H.M., VERSTRATEN, J.M., BRUIJNZEEL, L. y BOUTEN, W. 1986. Relationsships between precipitation chemistry and some metereological parameters in the Netherlands: A statical evaluation. *Water Air Soil Pollution*, 28, 213-223.

EATON, J.S., LIKENS, G.E. y BORMANN FH. 1973. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. *Journal Ecolology*, 61:495 –508.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

EHLERINGER, J.R y COOK, C.S. 1991. *Carbon isotope discrimination and xylem D/H ratios in desert plants*. Proceedings of an International Symposium on the Use of Stable Isotope in Plant Nutrition, Soil Fertility, and Environmental Studies: 489-497. International Atomic Energy Agency, Wien, Ostereich.

EHLERINGER, J.R y MOONEY, H.A. 1983. Productivity of desert and mediterranean-cliimate plants. En: Lange OL, PS Nobel, CB Osmond y H Ziegler (eds) *Physiological plant ecology* 4: 205-231. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

EHLERINGER, J.R., PHILLIPS, S.L, SCHUSTE, W.F.S. y SANDQUIST, D.R. 1991. Differential utilization of summer rains by desert plants: implications for competition and climate change. *Oecologia*, 88: 430-434.

ENCINAS, D. y CASADO, H. 1999. Rain-aerosol coupling in a rural area in the Basque Country (Spain): Scavenging ratios. *Aerosol Sci. Tech*, 30(5), 411–419.

ERIKSSON, E. 1953. Composition of atmospheric precipitation. Tellus 4:215 –232.

ERMAK, J., HRU KA, J., MARTINKOVA, M. y PRAX, A. 2000. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and Soil* 219, pp 103-116.

ESCARRÉ, A., A. CARRATALÁ, A. ÀVILA, J. BELLOT, J. PIÑOL y M. MILLÁN. 1999a. Precipitation chemistry and air pollution. pp 195-208 En: F. Rodà, J. Retana, C. A. Gracia y J. Bellot (ed). *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*, Springer, Berlín.

ESCARRE, A., CARRATALA, A., AVILA, A., BELLOT, J., PIÑOL, J. y MILLAN M. 1999. Precipitation chemistry and air pollution. En: Roda, F., Retana, J., Gracia, C.A, Bellot J, editors. *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ESCARRÉ, A., RODÀ, F., TERRADAS, J. y MAYOR, X. 1999b. Nutrient distribution and cycling. Pgs: 253-269 En: F. Rodà, J. Retana, C. A. Gracia y J. Bellot (editores). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests, Springer, Berlín.

ESTÉVEZ, A y PINA, J.A. 1989. Dunas, playas y marjales del cuaternario en el litoral sur de la Provincia de Alicante. En Escarré A, Martín J y Seva E (eds.) *Estudios sobre el medio y la biocenosis en los arenales costeros de la Provincia de Alicante*, cap II, pp. 15-26.

EZCURRA, A., CASADO, H., LACAUX, J.P. y GARCIA, C. 1988. Relationships between meteorological situations and acid rain in Spanish Basque Country. *Atmospheric Environment*, 22: 2779–2786.

FASSINA, V. 1980. The formation of atmosferic sulphates in the presence of ammonia and sulphur dioxide in Venice. Arch. Met. *Geoph. Bioki., Ser. B*, 28: 165-172.

FLANAGAN, L.B y EHLERINGER, J.R. 1991. Stable isotope composition of stem and leaf water: applications to the study of plant water-use. *Functional Ecology*, 5: 270-277.

FLANAGAN, L.B., EHLERINGER, J.R. y MARSHALL, J.D. 1992. Differential uptake of summer precipitation among co-ocurring trees and shrubs in a pinyon-juniper woodland. *Plant, Cell and Environment*, 15: 831-836.

FORD. E.D. Y DEANS, J.D. 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 15: 905-917.

FOSTER, N.W. y GESEL, S.P. 1972. The natural addition of nitrogen, potassium and calciun to a *Pinus banksina* Lamb. Forest floor. *Canadian journal of forest research*. 2(4). 448-455.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

GALLEGO, J.B., GARCÍA, M.R. y VEGA, C.L. 2003. Restauración de ecosistemas dunares costeros. En: Rey Benayas, J.M, Espigares T y Nicolau, J.M (eds.) *Restauración de ecosistemas mediterráneos*. 157-172. Ed. Colección Aula Abierta. Universidad de Alcalá.

GALLOWAY, J.N y LIKENS, G.E. 1978. The collection of precipitation for chemical analisis. *Tellus*. 30: 71-82.

GALLOWAY, J.N. 1995. Acid deposition: perspectives in time and space. *Water, Air, and Soil Pollution* 85: 15- 24.

GALLOWAY, J.N., LIKENS, G.E. y EDGERTON, E.S. 1976. *Hydrogenion speciation in the acid precipitation of the United States*. Ist. Int. Symp. Acid precipitation Forest Ecosistems. USDA Forest Service, General Technical Report NE-23.

GAMBELL, A.W. y FISHER, D.W. 1966. Chemical Composition of Rainfall, Eastern North Carolina and Southwestern Virginia. *Geological Survery Water-Supply Paper*. 1535 K: 1-41.

GARCIA, E. 2005. Balance de agua y de carbono en un ecosistema mediterráneo de costa. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

GATZ, D.F. 1983. Source Apportioonment of Rain Water Impurities in central Illinois. 76th anual meeting of the air pollution control association, Junio 2-16.

GEHÚ, J.M. 1986. La vegetation cotière. Faits de géosynvicariance atlantico-méditerranéenne. *Bull. Eco.*, 17: 179-187.

GEORGE, M. 1979. Nutrient return by stemflow, throughfall and rainwater in a Eucaliptus hybrid plantation. *Indian Forester*, 105(7). 493-499.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

GESPER, P.L y HOLOWAYCHUK, N. 1971. Some effects of stemflow from forets canopy trees on chemical properties of soils. *Ecology*, 52: 691-702.

GESPER, P.L. y HOLOWAYCHUCK, N. 1970. *Effects of stemflow water on a Miami soil under a beech tree*. I Morphological and physical properties. Soil Sciance Society of America Proceedings, 34, 779-786.

GIL OLCINA, A. 1994. Els climes del sud d´Alacant. En: *Atlas climátic de la Comunitat Valenciana* (1961-1990), Generalitat Valenciana, Conselleria de Obres Publiques, Urbanismo i transport (Eds.), pp. 138-140.

GIL PRADA, L.. 1993. *Los pinos como especies básicas de la restauración forestal en el mediterráneo*, Ecología, 1993 nº 17; pp.113-125.

GLOPPER, R.J. 1964. About the water contenent and shrinkage of some Dutch lacustrine and marine sedements. *Neth. J. Agric*, 12: 221-226.

GLOVER J.M., 1987. The use of sub-surface radar for shallow site investigations. Ph. D. Thesis, Kings College, University of London.

GONZÁLEZ HIDALGO, J.C., VICENTE, S.M., DE LUIS, M., STEPÁNEK, P., CUADRAT, J.M., RAVENTÓS, J. y SÁNCHEZ, J.R. 2002. *Variaciones estaciónales de la precipitación en la costa Este peninsular durante la década de los noventa*. Guijarro Pastor, J.A.; Grimalt Gelabert, M.; Laita Ruiz de Asúa, M.; Alonso Oroza, S. (Eds.) El agua y el clima. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A, nº 3. Pp. 229- 236.

GONZÁLEZ-ARIAS, A., AMEZAGA, I. ECHEANDÍA, A. Y ONAINDIA, M. 2000. Buffering capacity through cation leaching of Pinus radiata D. Don canopy. *Plant Ecology* 149: 23–42.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

GONZÁLEZ-ARIAS, A., AMEZAGA, I., ECHEANDIA, A., DOMINGO, M. y ONAINDIA, M. 1998. Effects of pollution on the nutrient return via litterfall for Pinus radiata plantations in the Basque Country. *Plant Ecol*, 139: 247–258.

GOODMAN, D. 1994. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59: 224–232.

GORHAM, E. 1958. The influence and importance of daily weather conditions in the supply of chloride, sulphate and other ions to fresh waters from atmospheric precipitation.

GORHAM, E., MARTIN, F.B y LITZAU, J.T. 1984. Acid Rain: Ionic Correlation in the Eastern United States, 1980-1981 *Science*, 225, 407-409.

GRACIA, C.A., SABATÉ, S. y LÓPEZ, B. 2004. Las raíces finas del encinar: un vector de transporte de carbono atmosférico al suelo. CEAM, Valencia: 483-518.

GRACIA, I. y ELEJALDE, C. 1978. Estimación de la contaminación atmosférica del agua de lluvia. I.C.N.Q. 1/3, pp 68-81.

GRANAT, L. 1978. Sulfate in precipitation as observed by the european atmospheric chemistry network. *Atmospheric Environment*, 12:413-424.

GRASS, M.J, DE LUIS, M. SÁNCHEZ, J.R, BONET, A y RAVENTOS, J. 2000. *Situación actual de los pinares en dunas costeras de litoral de la Comunidad Valenciana*. I Congreso de Ecología, AEET. Santiago de Compostela, Sept. 2000.

GROTE, K., HUBBARD, S., RUBIN, Y. 2003. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water Resources Research*, 39 (11), 1321–1335.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

GUTIÉRREZ, J.R. 2001. Dynamics of ephemeral plants in the coastal desert of north-central Chile. En: Prakash I (ed) *Ecology of desert environments*: 105-124. Scientific Publishers, Jodhpur, India.

HEDIN, L.O., ARMESTO, J.J. y JOHNSON, A.H. 1995. Patterns of nutrient loss from unpolluted, old growth temperate forest: evaluation of Prades and Montseny. In: F. Rodà, J. Retana, C. Gracia y J. Bellot (eds.) *Ecology of a Mediterranean Evergreen Oak Frest. Springer*. Berlin. P. 253-269.

HERNÁNDEZ, L., ALONSO, I., RUIZ, P., PÉREZ-CHACÓN, E., SUÁREZ, C. y ALCÁNTARA, J. 2002. Decadal environmental changes on the dune field of Maspalomas (Canary Islands): Evidences of an erosive tendency, en Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. y Das Neves, L. (Eds.): Littoral 2002. The Changing COSAT. Oporto, EUROCOAST, pp.519-527.

HERWITZ, S.R. 1986. Episodic stemflow inputs of magnesium and potassium to a tropical forest floor during heavy rainfall events. *Oecologia*, 70: 423-425.

HOFFMAN, W.A., LINDBERG, S.E. y TURNEWR, R.R., 1980. Some observations of organic constituents in rain above and below a forest canopy. *Environmental Science and Technology*, 14, 999–1002.

HRUSKA, J. CERMÁK, J y SVATOPLUK SUSTEK. 1999. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Journal Tree Physiology* 19, 125-130.

HUBER, A y TRECAMAN, R (2002) Efecto de la variabilidad interanual de las precipitaciones sobre el desarrollo de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en la zona de los arenales VIII Región, Chile. Bosque 23 (2): 43-49.

HUBER, A. y LÓPEZ, D. 1993. Cambios en el balance hídrico provocado por tala rasa de un rodal adulto de Pinus radiata, Valdivia, Chile. Bosque 14: 11-18.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

HUBER, A. y OYARZÚN, C. 1990. Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Turrialba,* 40: 503-508.

HUBER, A. y OYARZÚN, C. 1992. Redistribución de las precipitaciones en un bosque siempreverde del sur de Chile. *Turrialba,* 42: 192-199.

HUBER, A., OYARZÚN, C. y ELLIES, A. 1985. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* y una pradera. II: Humedad del suelo y evapotranspiración. Bosque 6: 74-82.

IBARRA, P. y ECHEVERRÍA, M.T. 2004. *Relaciones clima, suelo y vegetación e la Vertiente Noreste del Moncayo*. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico (eds.) pp 1-13.

IGME. 1981. Estudios para la planificación, gestión y conservación de acuíferos en la Cuenca Baja del Segura y Costeras de Alicante en 1982 *Informe sobre l a calidad de las aguas subterráneas en el año hidrológico* 1981-1982.

IGME. 1985. *Calidad de las aguas subterráneas en l a Cuenca del Segura*. In 1it. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.

JEGELRSMA, S., DE JONG, J., ZAGWIJN, W.H. y VAN REGTEREN, J.F. 1970. The coastal dunes of the western Netherlands; geology, vegetation, history and archeology. Mededelingen Rijks Geologische Dienst 21: 93-164.

JIMÉNEZ, M.T. 2001. Utilización de *Pistacia lentiscus* L. en la recuperación de la cubierta vegetal. Tesis de licenciatura. Universidad de Alicante.

JORDAN, C.F. 1978. Stemflow and nutrient transfer in a tropical rain forest. Oikos, 31: 257-263.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

JUNGE, C.E. y WERBY, R.T. 1958. The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium an sulfate in rain water over the Uinited States. *Journal. Meteorol.* 15: 417-425.

KEENE, W.C., PSZENNY, A.P., GALLOWAY, J.N y HAWLEY, M.E. 1986. Sea-Salt correlation and interpretation of Constituent Rations in Marine Precipitation. *J. Geophysical Res*., 91 (6), 6647-6658.

KELLMAN, M., 1979. Soil enrichment by neotropical savana trees. *Journal of Ecology*, 67: 565-577.

KELLY, J.M. y STRICKLAND, R.C. 1986. Throughfall and plant nutrient concetration response to simulated acid rain treatment. *Water, Air and soil pollution*, 29:219-231.

KELLY, J.M. y STRICKLAND, R.C., 1987. Soil nutrient leaching in response to simulated acid rain treatment. *Water, Air, and Soil pollution*, 34: 167-181.

KITTRIDGE, J.; 1973. Forest influences. New York:Dover.

KNAPP, R. 1973. Die vegetation von Afrika. G. Fisher. Stuttgart.

KOERSELMAN, W. 1992. The nature of nutrient limitation in Dutch dune slacks. En: Carter, Curtis y Sheehy-Skeffington (eds.) *Coastal dunes*, pp. 189-199.

KRAUSKOPF, B.K. 1979. *International series in the earth and planetary sciences. Introduction to Geochemistry*. 2a Ed. McGraw-Hill inc.

LACAUX, J.P. 1988. *Acid rain on local and regional scales in Spanish Basque Country* ISPRA COURSES, September 1-14.

LAMMERTS, E.J. y GROOTJANS, A.P. 1997. Nutrient deficiency in dune slack pioneer vegetation: a review. *Journal of Coastal Conservation*, 3: 87-94.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

LASCURAIN, J. 1987. Viatge entom d´una duna. Diputación de Barcelona. Servei del Medi Ambient.

LEVIA, D.F. 2004. Differential winter stemflow generation under contrasting storm condition in a southem New England broad-leaved deciduos forest. *Hydrological processes*, 18, 1105-1105.

LIKENS, G. E., BORMAN, F. H., PIERCE, R. S., EATON, J. S. y MUNN, R. E. 1984. Long-term trends in precipitation chemistry at Hubbard Brook, New Hampshire. *Atmospheric Environment*. 18: 2641–2647.

LIKENS, G. E., BORMAN, F.H., PIERCE, R.S., EATON, J. S. y JOHNSON N.M. 1977. Biogeochemistry of a forested ecosystem. Springer- Verlag. New York, 148 pp.

LIKENS, G.E., BORMAN, F.H., PIERCE, R.S., EATON, J.S. y JOHNSON N.M. 1995. *Biochemestry of a Forested Ecosystem*. 2nd. Edition. Springer. New York.

LIKENS, G.E., WRIGHT, R.F., GALLOWAY, J.N. y BUTLER, T.J. 1979. Acid rain. *Sci.Amer.* 241: 43-51.

LIM, B., JICKELLS, T.D. y DAVIES, T.D., 1991. Sequential sampling of particles major ions and total trace metals in wet deposition. *Atmospheric Environment* 25A, 745-762.

LIN T.C., HAMBURG S.P., KING H.B., HSIA Y.J. 2000. Throughfall patterns in a subtropical rain forest of northeastern Taiwan, J. Environ. Qual. 29 1186–1193.

LIN, Z.Q., SCHUEPP, P.H., SCHEMENAUER, R.S. y KENNEDY, O.O. 1995. Trace metal contamination in and on balsam fir (Abies balsamea (L) Mill.) foliage in Southern Quebec, Canada. *Water, Air and Soil Pollution,* 85: 175–191.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

LÓPEZ, B. F. 1990. Factores ambientales de la degradación del suelo en el área mediterránea. In: Albaladejo et al (Eds.), Soil degradation and rehabilitation in Mediterranean eviromental conditions, CSIC. Murcia (Spain). Pp 15-45.

LORENZO, H., CUÉLLAR, V. y HERNÁNDEZ, M.C. 2001. Close range radar remote sensing of concrete degradation in a textile factory floor. *Journal of Applied Geophysics*, 47: 327-336.

LOUSTAU, D., BERBIGIER, P., GRANIER, A., EL HADJ MOUSSA, F. 1992. Interception loss, througfall and stemflow in a maritime pine stand. I: Variability of througfall and stemflow beneath the pine canopy. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam. *Journal of Hydrology*, 138: 449-467.

LOVETT, G.M. 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective. *Ecol Appl*, 4:629 –650.

LOVETT, G.M. y LINDBERG, S.E. 1984. Dry depositation and canopy exchange in a mixed forest as determined by analysis of throughfall. *J. Appl. Ecol*. 21:1013-1027.

LOVETT, G.M., LINDBERG, S.E., RITCHTER, D.D. y JOHNSON, D.W. 1985 The effects of acidic deposition on cation leaching from three deciduos forest canopies. In: Canadian *Journal of Forest Research*. 15(6). 1055-1060.

LOVETT, O.M. Y LINDBERG, S.E. 1986. Dry deposition of nitrate to a deciduous forest. *Biogeochemistry* 2: 137–148.

LYNCH, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 109: 7-13.

LLEDÓ, M.J. 1990. Compartimentos y flujos biogeoquímicos en una cuenca del encinar del Monte Poblet. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

MAESTRE, F.T. 2002. La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de factores abióticos y bióticos. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

MARSH, W.M. 1990. Nourishment of perched sand dunes and the issue of erosion control in the Great Lakes. *Environ. Geol. Water Sc.*, 16 (2): 155-314.

MARTÍN, J., SEVA, A. y ESCARRÉ, A. 1989. Características del sustrato dunar. En: Escarré, A., Martín, J y Seva, E. (eds.) *Estudios sobre el medio dunar y la biocenosis*.

MARTIN, M., J. 1984. Variaciones estaciónales en el contenido de nutrientes y pigmentos en cuatro especies del pinar costero de Alicante. Memoria de tesis doctoral para obtener el grado de doctor en ciencias, departamento de biología, Universidad de Alicante.

MARTÍNEZ-MEZA, E. y WHITFORD, W.G. 1996. Stemflow, throughfall and channelization of stemflow by roots in three Chihuahuan desert shrubs. *Journal of Arid Environments*, 32: 271-287.

MAUCHAMP, A. y JANEAU, J.L. 1993. Water funnelling by the crown of Flourensia cernua, a Chihuahuan Desert shrub. *Journal of Arid Environments*, 25: 299-306.

MESZAROS, E. 1981. Atmospheric Chemistry Fundamental aspects. Estudies in Environmental Science 11. Elsevier Scientific publishing company. Asterdam, 201 pp.

MILLBANK, J.W. 1978. The contribution of nitrogen fixing lichens to the nitrogen status of their environment. *Ecol. Bull.* (Stockholm) 26:260-265.

MILLER, H.G., COOPER, J.M y MILLER, J.D. 1976. Effect of nitrogen supply on nutrients in litterfall and crown leaching in stand of Corsican Pine. *J. Appl. Ecol*. 13. 233-248.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

MILLER, R.B. 1963. Plant nutrient in hard beech. III The cycle of nutrients. N.Z.JI. Sci. 6: 388-413.

MIRA BOTELLA, F. 1906. Las dunas de Guardamar del Segura. Memorias de la SEHN. Tomo IV. Memoria 2: 57-77.

MONTENAT, C. 1973. Les formations néogènes et quaternaires du Levant espagnol. Tesis, Paris-Orsay.

MOONEY, D. y SWIFT R. 1999. A course in mathematical modelling. The Mathematical Association of America.

MORA, V., RODRÍGUEZ, E.T. y ARAGÓN, R. 1988. Intrusión marina fósil en el Campo de Cartagena (Murcia). Simp. Int. Tecnol. Intrusión en acuíferos costeros (TIAC'88). pp.221-236. Almuñecar.

MORENO-CASASOLA, P. 1982. Ecología de la vegetación de dunas costeras: factores físicos. Biótica 7 (4): 577-602.

NORDSTROM, K. 1994. Beaches and Dunes of human-altered coasts; Progress in physical Geography, 18 (4): 497-516.

OLSON, R.K., REINERS, W.A., CRONAN, C.S. y LANG, G.E. 1981. The chemistry and flux of throughfall and stemflow in subalpine balsam fir forest. *Holarctic Ecology*, 4:291-300.

ONYEKWELU, S.S.C. 1972a. The vegetation of dune slacks at Newborough Warre. I. Ordination of the vegetation. *Journal of Ecology*, 60: 887-98.

ONYEKWELU, S.S.C. 1972b. The vegetation of dune slacks at Newborough Warren. III. Plantago coronopus. *Journal of Ecology*, 60: 907-15.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

OOSTING, J.H. 1954. Ecological processes an vegetation of maritime stand in the Southeastern United States. Botanical Review, 20: 226-262.

ORELLANA E. 1971. Prospección geoeléctrica en corriente continua Editorial Paraninfo. Madrid, 578p

ORELLANA, E. 1982 Prospección geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid, 1-578.

PACKHAM, J.R y WILLIS, A.J. 1997. Ecology of dunes, salt marsh and shingles Chapman y Hall.

PARKER, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. Adv. *Ecol. Res*, 13:58-121.

PARKER, G.G. 1987. Uptake and release of inorganic ions by foliage: Evaluation of dry depositation, pollutant damage, and forest health with througfall studies. *Technical bulletin* Nº 532, NCASI, New York.

PASKOFF, R. 1993. Côtes en danger ; Masson, Paris, 250 pp.

PASKOFF, R. 1998. Les littoraux. Impact des amenagement sur leur évolution ; Armand Colin,París, 260 pp.

PAVLIK, B. M. 1984. Seasonal changes of osmotic preasure, simplasmic water content and tissue elasticity in the blades of dunes grasses growing in situ along the coast of Oregon. *Plant cell and Environ*, 7: 531-539.

PEHL, C.E. y RAY, K.F. 1984. Atmospheric nutrient inputs to three forest types in east Texas. *Forest Ecology and Management*. 7: 11-18.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

PEÑARROCHA, D. 1994. Precipitacions: Volums i distribucio espacial. En Atlas Climático de la Comunidad Valenciana (1961-1990). Pérez Cueva, A. Generalitat Valenciana, Conselleria de Obras Publicas urbanismo y Transporte. 86-89.

PEÑARROCHA, D., ESTRELA, Mª. J. y MILLÁN, M.M. (2002): "Classification of daily rainfall patterns in a Mediterranean area with extreme intensity levels: The Valencia Region", Int. *J. Climatol*, 22, pp. 677-695.

PEREZ CUEVA, A.J. 1994. *Atlas Climàtic de la Comunitat Valenciana* (1961-1990). Generalitat Valenciana. Conselleria d´Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Valencia.

PÉREZ GRACIA, J.A., CANAS, LL.G., PUJADES, J.C., CASELLES, O., GARCIA, F. y OSORIO, R. 2000. GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian cathedral (Spain) *Journal of Appied Geophysics*, 43 (2000). Pgs: 167-174.

PÉREZ GRACIA, J.A. 2001. *Radar de subsuelo evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Departamento de Ingeniería de Terreno, Cartográfica y Geofísica Universidad Politécnica de Cataluña.

PIÑOL, J. 1990. Hidrología i biogeoquímica de conques forestades de les Muntanyes de Prades. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.

PRATT, G.C. y KRUPA, S.V. 1985. Aerosol chemistry in Minnesota and Wisconsin and relation its relation to rainfaill chemistry. *Atmospheric Environment*, 19(6):961-971.

PREBBLE, R.E. y STIRK, G.B. 1980. Throughfall and stemflow on silverleaf ironbark (*Eucalyptus melanophloia*) trees. *Australian journal of Ecology*, 5: 419-427.

PRESSLAND, A.J. 1973. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F. Muell.) in south-western Queensland. *Australian Journal of Botany*, 21: 235-245.

Universitat d'Alicant
Universidad de Alicante

PRESSLAND, A.J. 1979. Soil moisture redistribution as affected by throughfall and stemflow in an arid zone shrub community. *Australian Journal of Botany*, 24: 641-649.

PROSPERO, J.M. 1996. Saharan dust transport over the north Atlantic ocean and the Mediterranean: an overview. In: S. Guerzoni y R. Chester (ed.) *The Impact of African Dust Across the Mediterranean*. Kluwer. Dordrecht. P. 133-151.

PROSPERO, J.M., NEES, R.T. y UEMATSU, M. 1987. Deposition rate of particulate and dissolved aluminum derived from Saharan dust in precipitation at Miami, Florida. *J. Geophys. Res*, 92: 14723- 14731.

PUIGDEFÁBREGAS, J. y PUGNAIRE, F.I. 1999. *Plant survival in arid environments. In Handbook of functional plant ecology*. Pugnaire, F.I. y Valladares, F. (Eds.) Marcel Dekker, New York, pp. 381-405.

PYE y TSOAR, H. 1990. *Aeolian sand and sand deposit*; Unwin Hyman, London, 396 pp.

QUARTO, R. y SCHIAVONE, D. 1994. Hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from electrical prospecting data from the apulian carbonate platform. *Journal of hydrology*, 1-154.

QUINN, A.C.M. 1977. *Sand dunes: formation, erosion and maintenance*. Anforas Forbartha. Dublin.

RANWELL, D. 1972. *Ecology of salt marshes and salt dunes*. Chapman and Hall. Londres. pp. 135-200.

RAVENTOS, J., DE LUIS, M., GRASS, M.J., CUFAR, K., GONZALES-HIDALGO, J.C., BONET, A., SÁNCHEZ, J.R. 2001. Ground of pinus pinea and pinus halepensis as affected

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

by dryness, marine spray and land use changes in a mediterranean semiarid ecosystem. *Dendrochronologia* 19 (2): 211-220.

REINERS, W.A. y OLSON, R.K. 1984. Effects of canopy components on throughfall chemistry: An experimental analysis. *Oecologia* (Berlin), 63: 320-330.

REYNOLDS, J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York.

RODÀ, F. 1983. Biogeoquímica de les aigües de pluja i de drenatge en alguns ecosistemes forestals del Montseny. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

RODA, F., SQUEO, F.A., AZÓCAR, A y CABRERA, H.M. 1999. Water and carbon relations in the genus Adesmia DC. (Papilionaceae) at different altitudes in the high north-central Chilean Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72: 201-211.

RODRIGO, A., AVILA, A. y RODA, F. 2001. The chemistry of precipitation, throughfall and stemflow in two holm oak (Quercus ilex L.) forests under a contrasted pollution environment in NE Spain. *The Science of the Total Environment*, 305: 195–205.

RODRÍGUEZ, E.T. 2002. Informe final sobre los sondeos y pozos de investigación, para captar agua del mar a través de acuíferos costeros, llevados a cabo en el litoral del sector meridional de la provincia de Alicante por parte del Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura.

RODRÍGUEZ, E.T. y GÓMEZ DE LAS HERAS, J. 1986. *Principales características de los acuíferos kársticos en la provincia de Alicante*. Jorn. Karst. Euskadi, II: San Sebastián: 205-221.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ROLFE, G.L., AKHTAR, M.A. y ARNOLD, L.E. 1978. Nutrient fluxes in precipitation, throughfall, and stemflow in oak-hickory forest. Water resources bulletin of American. *Water Resources Association*, 14(5): 1220-1226.

RUBIN, L.A. y FOWLER J.C. 1977. Ground probing radar for delineation of rock features. *Engineering Geology*, 12: 163-170.

RUIZ TAGLE, M., GONZÁLEZ-ASENSIO, A, y FRIAS, J. 1989. Evolución de la sobreexplotación en la Cubeta de El Saltador, Almería. In: *La sobreexplotación de acuíferos. Temas Geológico-Mineros*. Almería: 301-3 10.

RUIZ, F., GOMIS, V. y BLASCO, O. 1989. Programa para el cálculo de las concentraciones de las especies químicas y del estado de saturación de un agua natural. *Tecnología del agua*. Número 63. pp 65-77.

SAARENKO, T. y P. ROIMELA. 1998. *Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control*. Proceedings of 7th International Conference on GPR: 461-466.

SALISBURY, E.J. 1952. Downs and dunes, their Plant Life and its Environment Bell, London.

SANJAUME E y PARDO J. 1992. The dunes of the Valencian Coast (Spain): past and present. En: Carter RWG, Curtis T.G.T y Sheehy-Skeffington M.J (eds.) *Coastal dunes*, pp 475-486. Balkema.

SANJAUME, E. 1985. *Las costas valencianas. Sedimentología y morfología. Universitat de València*, Valencia, 505 pp.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

SAQUETE. F.A. 2005. Valoración de técnicas de preparación del terreno para conseguir acopio de agua en repoblaciones forestales de zonas semiáridas. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

SARMIENTO, C., 1984. *Los ecosistemas y la ecosfera*. Editorial Blume pp 111-118.

SCHAEFER, D.A., REINERS, W.A y OLSON, R.K. 1988. Factors controlling the chemical alteration of throughfall in a subalpine balsam fir canopy. *Environmental and Experimental Botany*, 28 (3): 175-189.

SCHROTH G., SILVA L.F., WOLF M.A., TEIXEIRA W.G. y ZECH W. 1999 Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry, perennial monoculture, fallow and primary forest in central Amazonia. Brazil. *Hydrol. Process*, 13: 1423–1436.

SCHWINNING S, DAVIS, K., RICHARDSON, L. y EHLERINGER, J.R. 2002. Deuterium enriched irrigation indicates different forms of rain use in shrub/grass species of the Colorado Plateau. *Oecologia*, 130: 345-355.

SCHWINNING, S y EHLERINGER, J.R. 2001. Water use tradeoffs and optimal adaptations to pulse driven arid ecosystems. *Journal of Ecology*, 89: 464-480.

SEINFELD, J. H., AND S. N. PANDIS. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Global Change*, 1326 pp., Wiley-Interscience, New York.

SEMB, A., HANSSEN, J.E., FRANCOIS, F., MAENHAUT, W. y PACYNA, J.M. 1995. Long range transpor and deposition of mineral matter as a source for base cations. *Water , Air, Soil Poll*, 85: 1993-1995.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

SERVERA, J. 1998. El sistemes dunars litorals holocènics: les dunes de Sa Ràpita-es Trenc (Mallorca). En: J. J. Fornós (Ed.), *Aspectes geològics de les Balears.* Univ. de les Illes Balears, Palma, 251-306.

SERVERA, J., 1997. Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears. Palma de Mallorca, España. Tesis doctoral. Universidad de islas Baleares.

SLATYER, R.O. 1965. Measurements of precipitation interception by an arid zone plant comunity (*Acacia aneura* F. Muell). *Arid Zone Res,* 25 : 181-192.

SMALL, H., STEVENS, T.S. y BAUMAN, W.C. 1975. Novel ion excange chromatographic method using conductimetric detection. *Anal. Chem,* 47: 1801.

SOLÍS, L., MORA, V., RODRÍGUEZ, E.T. y ARAGÓN, R. 1988. *Situación de la intrusión marina en la Cuenca del Segura*. Simp. Int. Tecnol. Intrusión en acuíferos costeros (TIAC'88). pp.249-265. Almuñecar.

SOLLINS, P., GRIER, C.C., McCORINSON, F.M., CROMACK, K.Jr., FOGEL, R. y FREDRIKSEN, R.L. 1980. The internal element cycles of and old-growth douglas-fir ecosystem in wester Oregon. *Ecological Monographs*, 50(3):261-285.

SQUEO, F.A., OLIVARES, N., VALENZUELA, A., POLLASTRI, A., AGUIRRE, E., ARAVENA, R., JORQUERA, C. y EHLERINGER, J.R. 2000. *Fuentes de agua utilizadas por las plantas desérticas y su importancia en planes de manejo y restauración ecológica*. Boletín de la Sociedad Botánica de México 65: 95-106.

SUSTEK, S., J. HRUSKA, M. DRUCKMULLER, y MICHALEK,T. 1999. Root surfaces in the large oak tree estimated by image analysis of the map obtained by the ground penetrating radar. *J. For. Sci,* 45:139–143.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

SWANT, W., 1984. Atmosferic contributions to forest nutrient cycling. *Water Resourses Bulletin*, 20(3): 313-321.

SZABÓ, M. 1985. Ecology of an oak forest in Hungary. Results of Sikfokut project Akademiai Kiado-Budapest. Jakucs.

TAMM, C.O. y COWLING, E.B. 1977. Acidic precipitation and forest vegetation. *Water, Air and soil pollution, 503-511 pp.*

TANAKA, T., TSUJIMURA, M. y TANIGUCHI, M. 1990. *Infiltration area of stemflow-induced water. In Annual Report Institute of Geoscience,* 17. University of Tsukuba. Institute of Geoscience, Tsukuba, Japan.

TENGEN, I. y FUNG, I. 1995. Contribution to the atmosferic mineral aerosol load from land sourse modification. *J. Geophys. Res.* 100. 18707-18726.

TERRADAS, J. 2001. *Ecología de la vegetación*. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes. Ediciones Omega, Barcelona.

THOM, B.G. 1978. Coastal sand deposition in Southeast Australia during the Holocene. En: Davies, J.L, y williams, A.J. (eds.), *landform evolution in Australia*, Australia National University Press, Camberra, 197-214.

THOMAS, D. 1999. Coastal and continental dune management into the twenty-first century; En: GOUDIE, A. S.; LIVINGSTONE, I. y STOKES, S. (Eds.): *Aeolian enviroments, sediments and landforms*; John Wiley and sons, London: 105-127.

TROMBLE, J.M. 1988. Water interception by two arid shrubs. *Journal of Arid Environments*, 15: 65-70.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

TSOAR, H. 1989. Características ecológicas, deterioro y recuperación del desierto de dunas arenosas. En: *Degradación de zonas áridas en el entorno mediterráneo*. Monografías de la Dirección General del Medio Ambiente.

TUKEY, H.B. 1970. The leaching of subtances from plants. *Ann.Rev.Plant.Physiol*. 21:305-324.

ULRICH, B. 1971. *Investigations on cycling of bioelement in forest of central Europe*. Productivity of forest ecosyst. 501-507. Unesco Brussels.

ULRICH, B. y PANKRATH, J., 1983. Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO2, alkali cations and chloride. In: Reidel Publ. Co. (Eds.) *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems*. Dordrecht, Netherlands, pp. 33–55.

ULRIKSEN, C.P., 1982. Application of impulse radar to civil engineering. Ph. D. Thesis, Lund University of Technology.

UNDERWOOD, J.K., WALLER, D.H. y THIRUMURTHI, D. 1988. The Influence of the Ocean on the Chemistry of Precipitation in Nova Scotia. *Atmosphere-Ocean*, 26(3): 467-479.

UNITED NATIONS ECONOMIC FOR EUROPE (UNECE). 2004. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest*. Part VII Metereological Measurements. International cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Effects on Forest. 40 pag.

UNTERBERGER, R.R. 1978. Radar propagation in rock salt. Geophysical Prospecting 26. pgs 312-335.

UNTERBERGER, R.R., 1974. *Electromagnetic wave propagation in salt, probing into salt with radar*. 4th Symposium on Salt, v.2, Rock Mechanics y Geophysics: 11-26.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

VALENTÍN, R., SCARASCIA-MUGNOSSA, G.E y EHLERINGER, J.R. 1992. Hydrogen and carbon isotope ratios of selected species of a Mediterranean macchia ecosystem. *Functional Ecology*, 6: 627-631.

VENEKLAAS, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forest Colombia. *J. Ecol*, 78: 974–992.

VIVILLE, D., BIRON, P., GRANIER, A., DAMBRINE, E. y PROBST, A.1993. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam. *Journal of Hydrology*, 144: 273-282.

WAINWRIGHT, J., PARSONS, A.J. y ABRAHAMS, A.D. 1999. Rainfall energy under creosotebush. *Journal of Arid Environments*, 43: 111-120.

WATTERS, R.J. y PRICE, A.G. 1988. Charge azoté et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolessivage et de drainage dans la savanne de Lambo (Cote d´Ivoire). *Rev. Ecol. Biol*. Sol 15. 1-20.

WHITE, E.J. y TURNER, F. 1970. A method of estimating income of nutrients in a catch airborne particles by a woodland canopy. *J. Appl. Eco,*. 7: 441-461.

WHITE, J.W.C., COOK, E.R., LAWRENCE, J,R. y BROECKER, W.S. 1985. The D/H ratios of sap in trees: implications for water sources and tree ring D/H ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 237-246.

WHITFORD, W. 2002. *Ecology of desert systems*. Academic Press. Elsevier science Imprint. London. 343 pp.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

WIELOPOLSKI, L., HENDREY, G., MCGUIGAN, M. y DANIELS, J. 2002. Imaging Tree Root Systems In Situ. Nineth International Conference on Ground Penetrating Radar. Sta Barbara, California, USA, April 29-May 2, pp 58-62.

WILLIAMS, D.G y EHLERINGER, J.R. 2000. Intra and interspecific variation for summer precipitation use in pinyon-juniper woodlands. *Ecological Monographs,* 70: 517-537

WILLIS, A.J. 1963. Braunton Burrows: the effects on the vegetation of the addition of mineral nutrients to the dune soils. *J. Eco,* 51: 353-74.

WILLIS, A.J. 1965. The influence of mineral nutrients on the growth of ammophila arenaria. *J. Ecol,* 53: 735-45.

WILLIS, A.J. y YEMM, E.W. 1961. Braunton Burrows: mineral nutrien status of the dune soil soils. *J. Ecol*., 49: 377-90

WILLIS, A.J., FOLKES, B.F., HOPE-SIMPSON, J.F. y YEMM, E.W. 1959. Braunton Burrows: the dune system and its vegetation. Part II. *Journal of Ecology,* 47: 249-288.

WOLAVER T. G y LIETH H. 1972. *Precipitation chemistry*. Theory and cuantitative models. Univ. North Carolina, División de Ecol. Res. Chapel Hill, 75pp.

WOODRUFF, N.P. AND F.H. SIDDOWAY. 1965. A wind erosion equation. Soil Science Soc. of Amer. Proc. 29(5):602-608.

XIAONIU, X., QIN, W. y EIJI, H. 2005. Precipitation partitioning and related nutrient fluxes in a subtropical forest in Okinawa, Japan. *Annals. Fororest. Science*, 62: 245–252.

YASSOGLOU, N. 1987. Land use in the dry Mediterranean Region. En: *Eremology* (Desert Science). 355-373pp. Proceedings of a Post-Graduate Course held in Ghent, Belgium, 31 August. 427pp.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ZAMORA, R., GÓMEZ, J.M., GARCIA, D., HÓDAR, J.A. y BARAZA E. 2001. *El papel de los matorrales en la regeneración forestal*, Quercus, nº 187, pp 41-47.

ZENG, Y. y HOPKE, P. K. 1990: Methodological study applying three-mode factor analysis to three-way chemical data sets. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, **7,** 237–250.

ZINQUE, P.J. 1962. The pattern of influence of individual forest trees on soil properties. *Ecology*, 43 (1): 130-133.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

ANEXOS

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1. EVIDENCIA FOTOGRAFICA EN EL ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR CON GPR

Foto 1. Prueba de detección de raíces

Foto 2. Especie seleccionadas

Foto3. Desentierro mecánico

Foto 4. Desentierro manual

Foto 5. Etiquetado

Universidad de Alicante

Foto 6. Otro tipo de muestreo

Foto 7. Trazado de perfiles

Foto 8. Muestreo con antena de 500 MHZ

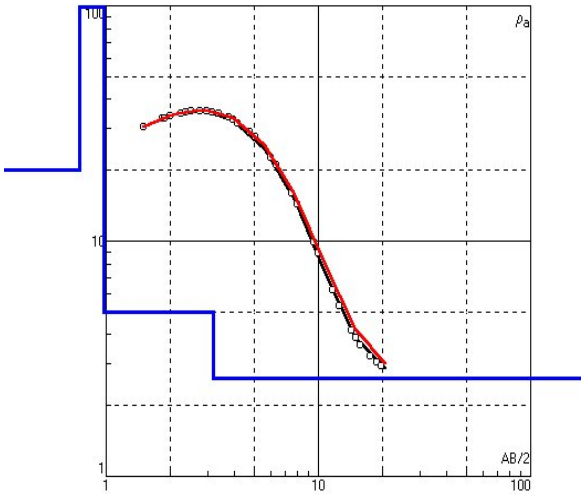
Foto 9. Muestreo con antena de 1000 MHZ

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

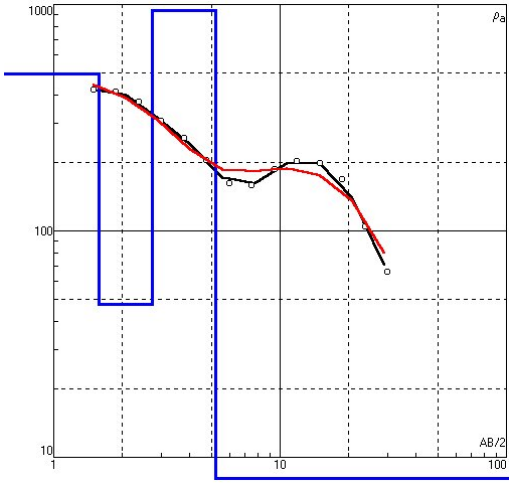
Foto 10. Recipientes para muestreo de trascolación

Foto 11. Pinos afectados por spray marino

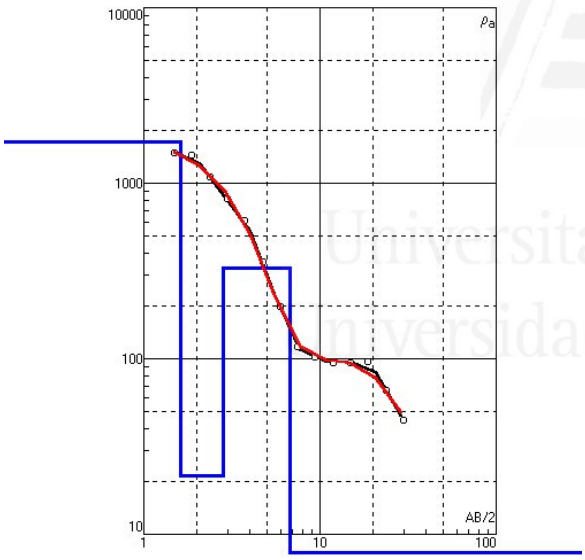
2. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (S.E.V)



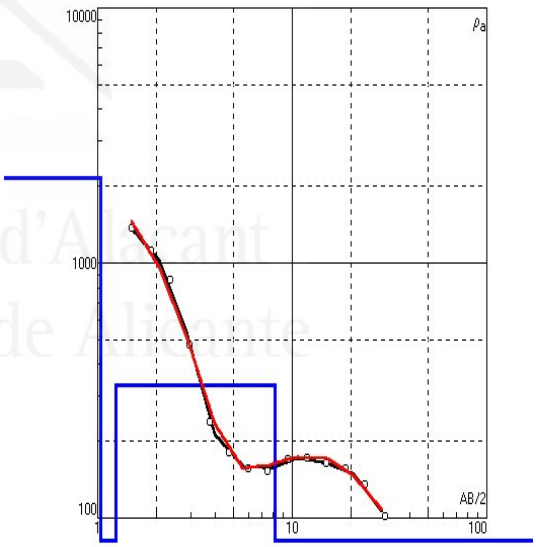
Curva S.E.V vivero



Curva S.E.V salidero1

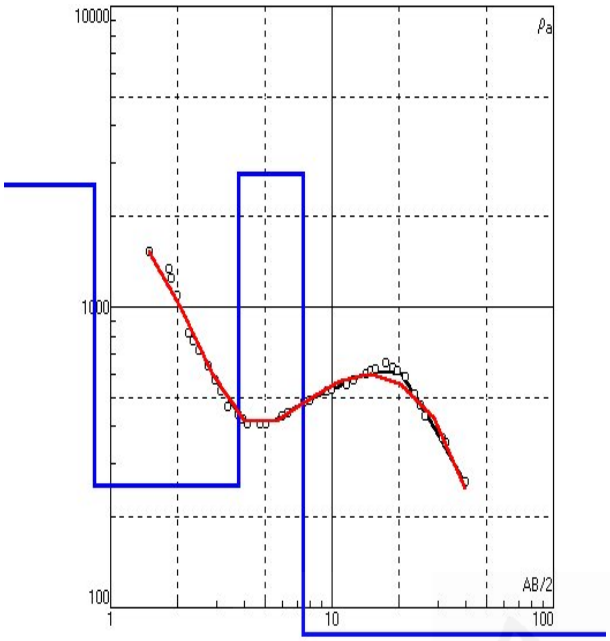


Curva S.E.V salidero 2

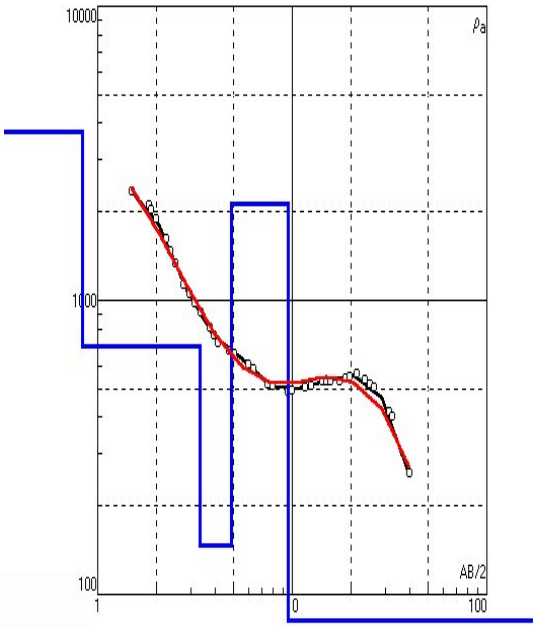


Curva S.E.V salidero 3

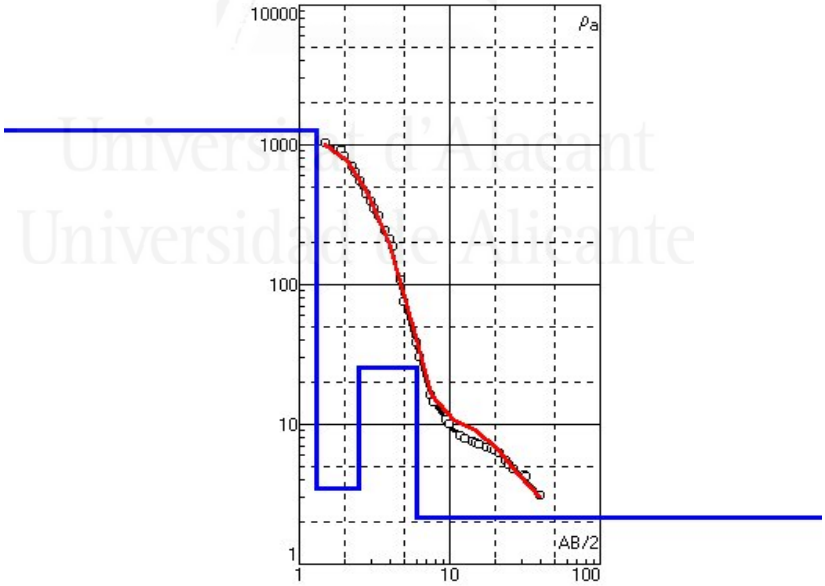
Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Curva fonviv 1



Curva fonviv 2



Curva fonviv 3

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Espesor de la capa-1 – Suelo vegetal o arenas secas.

A continuación se muestra el resultado de los reportes estadísticos generados de los datos originales para este parámetro, así como el reporte correspondiente a la red interpolada y limpia.

Reporte de Espesor Capa-1

Data Source Report – Espesor Capa1 (Suelo Vegetal o arenas secas)

Wed Nov 02 11:05:13 2005
Elasped time for gridding: 0.53 seconds

Data Source

Source Data File Name: Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Datos SEV - Lucho.xls
X Column: D
Y Column: E
Z Column: G

Data Counts

Active Data: 11
Original Data: 11
Excluded Data: 0
Deleted Duplicates: 0
Retained Duplicates: 0
Artificial Data: 0
Superseded Data: 0

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Univariate Statistics

	X	Y	Z
Minimum:	705806	4213870	0.75
25%-tile:	706016	4213913	0.838
Median:	706319	4219745	1.04
75%-tile:	706434	4221298	1.58
Maximum:	706683	4221309	3.531
Midrange:	706244.5	4217589.5	2.1405
Range:	877	7439	2.781
Interquartile Range:	418	7385	0.742
Median Abs. Deviation:	168	1553	0.27
Mean:	706232.27272727	4218839	1.3016363636364
Trim Mean (10%):	706229.55555556	4219116.6666667	1.1152222222222
Standard Deviation:	259.58431487462	3100.9641902303	0.76468511317
Variance:	67384.016528926	9615978.9090909	0.58474332231405
Coef. of Variation:			0.5874798327241
Coef. of Skewness:			2.1364199847775

Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.860	-0.046
Y:		1.000	-0.036
Z:			1.000

Grid Information Report - Espesor Capa1 (Suelo Vegetal o arenas secas)

Mon Nov 28 00:01:34 2005

Grid File Name:	Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Espesor Capa1-MinCurv-limpio.grd
Grid Size:	150 rows x 19 columns
Total Nodes:	2850
Filled Nodes:	2850
Blanked Nodes:	0

Grid Geometry

X Minimum:	705806
X Maximum:	706683
X Spacing:	48.722222222222
Y Minimum:	4213870
Y Maximum:	4221309
Y Spacing:	49.926174496644

Grid Statistics

Z Minimum:	0
Z 25%-tile:	1.0483483744228
Z Median:	1.2843451890836
Z 75%-tile:	1.4821333921976
Z Maximum:	3.989306089268
Z Midrange:	1.994653044634
Z Range:	3.989306089268
Z Interquartile Range:	0.43378501777479
Z Median Abs. Deviation:	0.21111912376024
Z Mean:	1.2827563822875
Z Trim Mean (10%):	1.266624155804
Z Standard Deviation:	0.52685200290824
Z Variance:	0.27757303296842
Z Coef. of Variation:	0.41071867595678
Z Coef. of Skewness:	0.67358382146374
Z Root Mean Square:	1.3867360849375
Z Mean Square:	1.9230369692678

Techo de la capa-2 – Arenas parcialmente saturadas de agua

A continuación se muestra el resultado de los reportes estadísticos generados de los datos originales para este parámetro, así como el reporte correspondiente a la red interpolada y limpia.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Reporte de profundidad del Techo Capa-2

Data Source Report – Techo capa2 (Arenas parcialmente saturadas de agua)

Thu Nov 03 09:12:58 2005
Elasped time for gridding: 0.69 seconds

Data Source

Source Data File Name: \Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Datos SEV - Lucho.xls
X Column: D
Y Column: E
Z Column: H

Data Counts

Active Data: 11
Original Data: 11
Excluded Data: 0
Deleted Duplicates: 0
Retained Duplicates: 0
Artificial Data: 0
Superseded Data: 0

Univariate Statistics

	X	Y	Z
Minimum:	705806	4213870	0.75
25%-tile:	706016	4213913	0.838
Median:	706319	4219745	1.04
75%-tile:	706434	4221298	1.58
Maximum:	706683	4221309	3.531
Midrange:	706244.5	4217589.5	2.1405
Range:	877	7439	2.781
Interquartile Range:	418	7385	0.742
Median Abs. Deviation:	168	1553	0.27
Mean:	706232.27272727	4218839	1.3016363636364
Trim Mean (10%):	706229.55555556	4219116.6666667	1.1152222222222
Standard Deviation:	259.58431487462	3100.9641902303	0.76468511317
Variance:	67384.016528926	9615978.9090909	0.58474332231
Coef. of Variation:			0.5874798327241
Coef. of Skewness:			2.1364199847775

Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.860	-0.046
Y:		1.000	-0.036
Z:			1.000

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Grid Information Report - Techo Capa2 (Arenas parcialmente saturadas de agua)

Mon Nov 28 01:19:57 2005

Grid File Name:	\Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Techo Capa2-MinCurv-limpio.grd
Grid Size:	150 rows x 19 columns
Total Nodes:	2850
Filled Nodes:	2850
Blanked Nodes:	0

Grid Geometry

X Minimum:	705806
X Maximum:	706683
X Spacing:	48.722222222222
Y Minimum:	4213870
Y Maximum:	4221309
Y Spacing:	49.926174496644

Grid Statistics

Z Minimum:	0
Z 25%-tile:	0.96412919695166
Z Median:	1.385907890312
Z 75%-tile:	1.665478933724
Z Maximum:	4.5696988576754
Z Midrange:	2.2848494288377
Z Range:	4.5696988576754
Z Interquartile Range:	0.7013497367723
Z Median Abs. Deviation:	0.35474360751415
Z Mean:	1.400780876962
Z Trim Mean (10%):	1.3642746806906
Z Standard Deviation:	0.68302992000979
Z Variance:	0.46652987162858
Z Coef. of Variation:	0.48760654235309
Z Coef. of Skewness:	0.9269828276043
Z Root Mean Square:	1.558434129789
Z Mean Square:	2.4287169368911

Espesor de la capa-2 – Arenas parcialmente saturadas de agua.

A continuación se muestra el resultado de los reportes estadísticos generados de los datos originales para este parámetro, así como el reporte correspondiente a la red interpolada y limpia.

Reporte de Espesor Capa-2

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Data Source Report – Espesor capa2 (Arenas parcialmente saturadas de agua)

Thu Nov 03 16:00:42 2005
Elasped time for gridding: 0.69 seconds

Data Source

Source Data File Name: \Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Datos SEV - Lucho.xls
X Column: D
Y Column: E
Z Column: I

Data Counts

Active Data: 10
Original Data: 10
Excluded Data: 0
Deleted Duplicates: 0
Retained Duplicates: 0
Artificial Data: 0
Superseded Data: 0

Univariate Statistics

	X	Y	Z
Minimum:	705771	4213870	0.202
25%-tile:	705869	4213913	1.19
Median:	706366	4221259	4.78
75%-tile:	706487	4221287	10.9
Maximum:	706780	4221300	22.2
Midrange:	706275.5	4217585	11.201
Range:	1009	7430	21.998
Interquartile Range:	618	7374	9.71
Median Abs. Deviation:	350	1438	3.62
Mean:	706225.1	4218764.1	6.6902
Trim Mean (10%):	706212.5	4219058.875	5.5625
Standard Deviation:	351.66530963403	3240.7744583664	6.3797182038081
Variance:	123668.49	10502619.09	40.70080436
Coef. of Variation:			0.95359155239
Coef. of Skewness:			1.2832970419857

Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.720	0.404
Y:		1.000	0.652
Z:			1.000

Grid Information Report – Espesor capa2 (Arenas parcialmente saturadas de agua)

Mon Nov 28 01:24:34 2005
Grid File Name: E:\Alicante\Lucho\Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Espesor Capa2-MinCurv-limpio.grd

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Grid Size:	150 rows x 19 columns
Total Nodes:	2850
Filled Nodes:	2850
Blanked Nodes:	0

Grid Geometry

X Minimum:	705806
X Maximum:	706683
X Spacing:	48.722222222222
Y Minimum:	4213870
Y Maximum:	4221309
Y Spacing:	49.926174496644

Grid Statistics

Z Minimum:	0
Z 25%-tile:	1.1993397035039
Z Median:	3.1269298535645
Z 75%-tile:	6.7441372707431
Z Maximum:	72.228492295879
Z Midrange:	36.114246147939
Z Range:	72.228492295879
Z Interquartile Range:	5.5447975672392
Z Median Abs. Deviation:	2.6055737249414
Z Mean:	6.5272617575305
Z Trim Mean (10%):	4.7620001601659
Z Standard Deviation:	10.493612230194
Z Variance:	110.11589763767
Z Coef. of Variation:	1.6076591716407
Z Coef. of Skewness:	3.1789222866121
Z Root Mean Square:	12.358035591832
Z Mean Square:	152.72104368899

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Techo de la capa-4 – Arenas saturadas de agua salada o intrusión marina

A continuación se muestra el resultado de los reportes estadísticos generados de los datos originales para este parámetro, así como el reporte correspondiente a la red interpolada y limpia.

Data Source Report – Techo capa 4 (Arenas saturadas de agua salada o intrusión marina)

Thu Nov 03 16:39:11 2005
Elasped time for gridding: 0.41 seconds

Data Source

Source Data File Name: \Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Datos SEV - Lucho.xls

X Column:	D
Y Column:	E
Z Column:	J

Data Counts

Active Data:	14
Original Data:	14
Excluded Data:	0
Deleted Duplicates:	0
Retained Duplicates:	0
Artificial Data:	0
Superseded Data:	0

Univariate Statistics

	X	Y	Z
Minimum:	705771	4213870	0.97
25%-tile:	706016	4219622	6.09
Median:	706326	4219821	7.41
75%-tile:	706467	4221287	9.55
Maximum:	706780	4221309	24.6
Midrange:	706275.5	4217589.5	12.785
Range:	1009	7439	23.63
Interquartile Range:	451	1665	3.46
Median Abs. Deviation:	287	1466	2.14
Mean:	706255.21428571	4219137.9285714	8.8665
Trim Mean (10%):	706251.83333333	4219396	8.2134166666667
Standard Deviation:	304.92743365581	2827.9038795618	5.467951519667
Variance:	92980.739795918	7997040.3520408	29.898493821429
Coef. of Variation:			0.6166978536815
Coef. of Skewness:			1.5516148599129

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.710	0.133
Y:		1.000	0.323
Z:			1.000

Grid Information Report – Techo capa 4 (Arenas saturadas de agua salada o intrusión marina)

Mon Nov 28 01:31:16 2005	
Grid File Name:	\Mapas SURFER-Dunas Guardamar del Segura\Techo Capa4-MinCurv-limpio.grd
Grid Size:	150 rows x 19 columns
Total Nodes:	2850
Filled Nodes:	2850

Blanked Nodes:	0

Grid Geometry

X Minimum:	705806
X Maximum:	706683
X Spacing:	48.722222222222
Y Minimum:	4213870
Y Maximum:	4221309
Y Spacing:	49.926174496644

Grid Statistics

Z Minimum:	0
Z 25%-tile:	3.0290107049249
Z Median:	6.0539198437885
Z 75%-tile:	8.6560325083907
Z Maximum:	21.392518103488
Z Midrange:	10.696259051744
Z Range:	21.392518103488
Z Interquartile Range:	5.6270218034658
Z Median Abs. Deviation:	2.8371048955856
Z Mean:	6.0612514192998
Z Trim Mean (10%):	5.8450151935199
Z Standard Deviation:	4.0557558024235
Z Variance:	16.449155128892
Z Coef. of Variation:	0.66912845580196
Z Coef. of Skewness:	0.60565828309443
Z Root Mean Square:	7.2930051348437
Z Mean Square:	53.187923896856

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante