

# **Comportament de l'aigua subterrània a la vall Salada de Cardona**

Memòria realitzada per:  
Josep Font Soldevila  
per optar al grau de Doctor per la UPC

Director de tesi:  
Josep Maria Mata-Perelló

Programa de doctorat:  
Recursos Naturals i Medi Ambient

**Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals**  
Universitat Politècnica de Catalunya

Manresa, novembre de 2005

### 3.3. Prospeccions

#### Índex

3.3. Prospeccions .....	91
3.3.1. Prospecció geolèctrica .....	92
Introducció a la prospecció .....	92
Metodologia emprada.....	92
Recopilació de dades geolèctriques històriques .....	94
Sondeig paramètric.....	97
Campanya geolèctrica del 1997.....	98
Campanya geolèctrica del 2003.....	100
Campanya geolèctrica del 2004.....	106
3.3.2. Georadar .....	108
Introducció .....	108
Georadar a la vall Salada.....	108
Georadar al peu de la Muntanya de Sal.....	112
3.3.3. Sísmica de reflexió i refracció .....	114
Introducció a la prospecció sísmica .....	114
Metodologia emprada.....	114
Sísmica de refracció .....	114
Sísmica de reflexió .....	115
Equips utilitzats, treball de camp i situació dels perfils geofísics .....	115
Resultats obtinguts .....	117
Conclusions de la sísmica .....	126
3.3.4. Prospecció electromagnètica .....	128
Introducció a la prospecció electromagnètica .....	128
Metodologia emprada.....	128
Material .....	129
Treballs realitzats .....	129
Resultats obtinguts i conclusions .....	131
3.3.5. Prospecció gravimètrica .....	134
Introducció a la prospecció gravimètrica .....	134
Mètode gravimètric .....	134
Principi del mètode .....	134
Material emprat .....	135
Resultats obtinguts i interpretació de les dades.....	135
Comparació entre la prospecció gravimètrica i la electromagnètiques .....	135
Conclusions.....	136
3.3.6. Sondejos mecànics.....	138
Sondejos històrics.....	138
Sondejos a la vall entre el 1984 i el 1992.....	139
Sondejos a la vall el 1993.....	139
Sondejos pel dipòsit controlat de residus el 1997 .....	140
Piezòmetres al costat del canal de l'Aranyó el 1999 .....	141
Sondejos inclinats.....	141
Sondejos a la llera abandonada del Cardener el 2004 .....	142
3.3.7. Assajos amb traçadors .....	143
Introducció als assajos amb traçadors .....	143
Primers assajos amb traçadors.....	143
Assajos de traçadors el 1997 .....	143
Assajos de traçadors el 1999 .....	145
Assaig de traçador el 2004 .....	147

### 3. RESULTATS HIDROGEOOLÒGICS

#### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

##### *Introducció a la prospecció*

En aquest apartat es descriuen les tres campanyes realitzades per l'autor més les recerques dels antecedents d'aquest mètode a la vall Salada. Es comença per la campanya de prospecció geolèctrica realitzada el 1997 seguint pautes similars de campanyes anteriors que es van realitzar per la mina. Aquests antecedents que s'han pogut recopilar al llarg dels anys ja aporten molta informació. Seguidament es fa una interpretació raonada de la prospecció geolèctrica que s'ha realitzat al mig de la vall, amb la finalitat de detectar les característiques del subsòl, principalment sobre la zona de la rampa de Sant Onofre. S'inclou també una recopilació de sondejos elèctrics verticals (SEV) i tomografies elèctriques realitzats per l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) amb motiu d'uns col·lapses molt importants apareguts al bell mig de la llera del Cardener. S'acaba aquest apartat amb unes experiències de permeabilitat elèctrica entre diferents hipòtesis de recorregut que ha pogut seguir l'aigua fins a arribar a la rampa de Sant Onofre.

A la zona de la rampa de Sant Onofre, com que s'han pogut obtenir alguns antecedents dels SEV realitzats el 1985 i també s'ha pogut deduir el seu emplaçament, es comparen els resultats d'abans i els d'ara, per tenir d'aquesta manera una aproximació de l'evolució dels materials en profunditat. Per aquesta raó la metodologia que s'ha emprat ha consistit a estudiar els resultats de la campanya del 1985, amb la qual s'ha pogut reconèixer la manera com es va realitzar la prospecció, i posteriorment fer la mateixa prospecció però el 1997, encara que s'ha de considerar que hi ha canvis en els materials superficials i fins i tot la morfologia d'alguns indrets és diferent.

##### *Metodologia emprada*

##### *Sondeig elèctric vertical (SEV)*

El mètode geofísic de sondeig elèctric vertical (SEV) que s'ha utilitzat ha estat el de dispositiu Schlumberger simètric. El sondeig elèctric vertical (SEV) consisteix a establir la corba de variació amb la profunditat de la resistivitat aparent del terreny, la qual depèn de les característiques elèctriques de cada capa geològica (tipus de roca i tipus de fluid que ocupa els porus d'aquesta roca).

L'obtenció d'aquesta corba s'obté fent mesures en superfície de la intensitat de camp elèctric creat per dos elèctrodes de corrent situats als extrems de la línia d'inspecció (en la nomenclatura: extrems de l'ala AB), i de la diferència de potencial entre dos elèctrodes centrats simètricament al punt mitjà de l'ala AB (punts metres i N); vegeu l'esquema del dispositiu a la figura núm. 52 i 53. La fondària d'investigació es regula variant la distància entre els punts A i B, de manera que les línies del corrent penetren més dins del subsòl com més gran sigui aquest. El resultat són una sèrie de valors puntuals de resistivitats aparents al centre de l'ala que, un cop processades, donen compte de la distribució de les electrocapas en fondària.

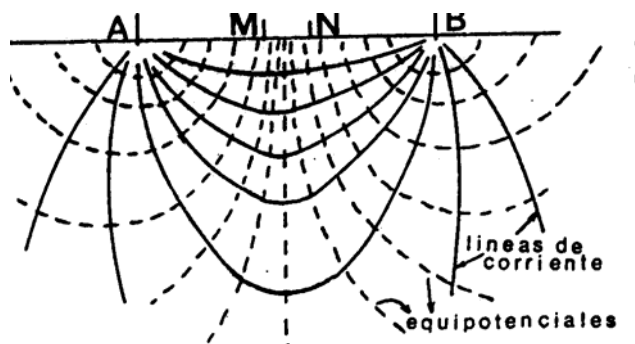
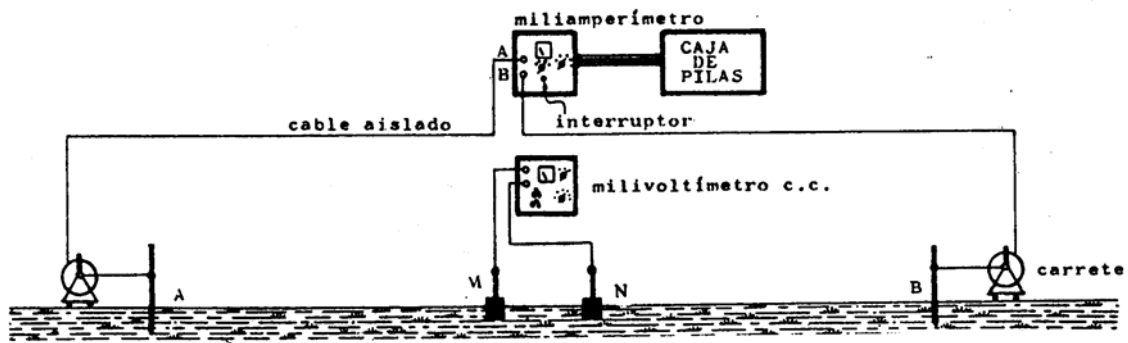


Figura núm. 52. Comportament del flux elèctric en un medi homogeni

### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

#### EQUIPO DE RESISTIVIDADES DE C. C.



A y B electrodos de corriente.  
M y N electrodos de potencial.

Fig. 30

Figura núm. 53. Esquema de disposició dels elèctrodes d'emissió A i B i dels de recepció metres M i N.

L'equip geolèctric utilitzat constava de:

- Mil·livoltímetre GEOTRON mod. Geo-300 de les característiques següents:
  - Intervals de mesura: 11, d'1 mV a 100 V de fons d'escala (seqüència: 1, 3, 10, 30, etc.).
  - Precisió: 1 %
  - Lectura mínima: 0,1 mV
  - Marges de temperatura: de -55 °C a 100 °C
  - Impedància d'entrada: 105 M
  - Rebuig a AC: 80 db a 50 Hz
  - Compensació: dispositiu per a l'anul·lació de corrents de 0 V a 300 V en qualsevol interval.
  - Alimentació: bateries de mercuri de 15 V.
- Mil·liamperímetre GEOTRON de les característiques següents:
  - Marges de mesura: 30, 100, 300, 1000, i 3000 mA.
  - Precisió :  $\pm 1$  %
  - Selector de tensió de sortida pels elèctrodes A i B de: 50, 100, 150, 200 300 i 400 V.

Les dades dels SEV realitzats per l'Institut Cartogràfic de Catalunya (2003) s'han adquirit amb l'equip següent:

- 1 mil·livoltímetre G-300 (rang 1.000 - 1 mV).
- 1 mil·liamperímetre G-400 (rang 3.000 - 1 mA)
- 1 font d'alimentació: generador de 3,2 kW.
- Cables elèctrics i conjunt d'elèctrodes impolaritzables.

Les dades de la tomografia elèctrica SEV realitzada per l'Institut Cartogràfic de Catalunya (2003) s'han adquirit amb l'equip següent:

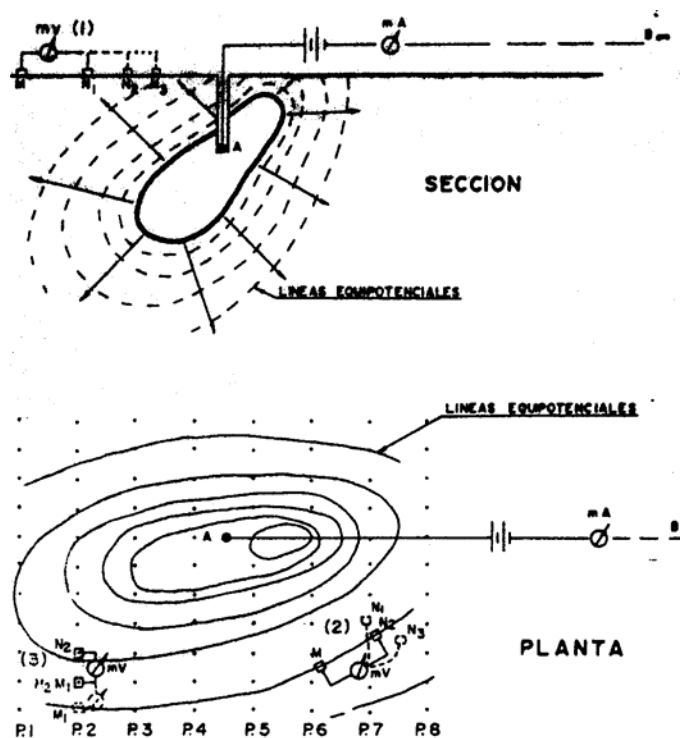
- 1 enregistrator multielectròdic RESISTAR (Geofizica, Inc.).
- 3 cables de 8 elèctrodes.
- 24 conjunts d'elèctrodes.

Les resistivitats experimentals dels SEV han estat modelitzades emprant el programa d'inversió Resix de la casa comercial Interprex.

#### ***Posada a massa o potencial artificial (mise à la place)***

El mètode de posada a massa o de potencials artificials consisteix a estudiar el camp elèctric generat per un dels elèctrodes del circuit de corrent col·locat directament al cos que s'investiga (vegeu la figura núm. 54), en aquest cas en el flux de l'aigua que va a parar al fons de la rampa de Sant Onofre.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



**Figura núm. 54. Esquema interpretatiu de la metodologia de potencial artificial o de posada a massa (*mise à la place*) utilitzada per determinar aportacions d'aigua al fons de la rampa de Sant Onofre**

Per a la utilització correcta del mètode és condició necessària que el cos que s'estudia sigui molt més conductor que el medi encaixant. En el cas present, succeeix així en la majoria del trajecte quan l'aigua entra en contacte amb la sal.

L'instrumental emprat ha estat el mateix per a la realització dels SEV, és a dir, el mil·livoltímetre GEOTRON mod. Geo-300 i el mil·liamperímetre GEOTRON.

La metodologia emprada en aquesta prova va consistir a mesurar quin flux geoelèctric hi havia entre el fons de la rampa inundada de Sant Onofre i altres indrets (vegeu la figura núm.65), com són l'assut de derivació de la Plantada, derivació cap al túnel del riu, font que desapareix al peu del castell i assut de la Coromina.

#### **Tomografia elèctrica**

La tomografia elèctrica consisteix també a realitzar mesures elèctriques al llarg d'una línia, però amb una malla més densa de punts. D'aquesta manera s'obté una imatge més resolutiva del subsòl, però de menor fondària ja que tant l'obertura d'ales AB com MN estan molt limitades.

Les resistivitats experimentals dels perfils de tomografia elèctrica han estat modelitzades emprant el programa d'inversió Res2Dinv (V32, Geotomo 2003).

#### **Recopilació de dades geoelèctriques històriques**

Són importants les dades geoelèctriques que es van trobar amb motiu de la construcció de la rampa de Sant Onofre a principis dels anys setanta, ja que en una àmplia campanya sobre els primers trams (vegeu la figura núm. ---) de la rampa de Sant Onofre els resultats (Barrera 1970) van ser:

“En el primer tramo de rampa, la zona [aproximadament a la meitat el primer tram de la rampa] corta la sal no compacta en 40 metros de longitud y presenta las ligeras filtraciones anteriormente apuntadas. Es absolutamente inevitable pasar al principio la zona superficial meteorizada, pero por tratarse de la loma de San Onofre –no cuenca de recepción– es inofensiva.

En el segundo tramo de rampa, el techo de sal compacta queda a más de 100 metros de altura sobre la galería. Sin embargo, bajo el SEV n° 9 se presenta una zona de baja resistividad a los 88 metros de profundidad, situando el horizonte de sal compacta 36 metros sobre la rampa. Pero la interpretación de dicho sondeo n° 9 no acusa disolución, y del resultado general se desprende que un posible cauce de filtración que por este punto pasara, tiende a desplazarse hacia el Sur, aumentando así la distancia a la rampa. Repetido el dicho sondeo n° 9 no confirmó la baja resistividad a

### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

profundidad. En resumen, en el caso más pesimista quedará un techo de 36 metros de sal compacta, y el resto, gran espesor de sal alterada, pero sin disolución; todo ello en un único punto muy localizado”.

A més de la campanya anterior s'han de considerar els SEV de l'any 1985, ja que s'ha pogut obtenir una col·lecció de perfils geofísics, realitzats també sobre la rampa de Sant Onofre els anys 1970, 1974, 1977, 1978 i 1981 (vegeu la figura núm. 55).

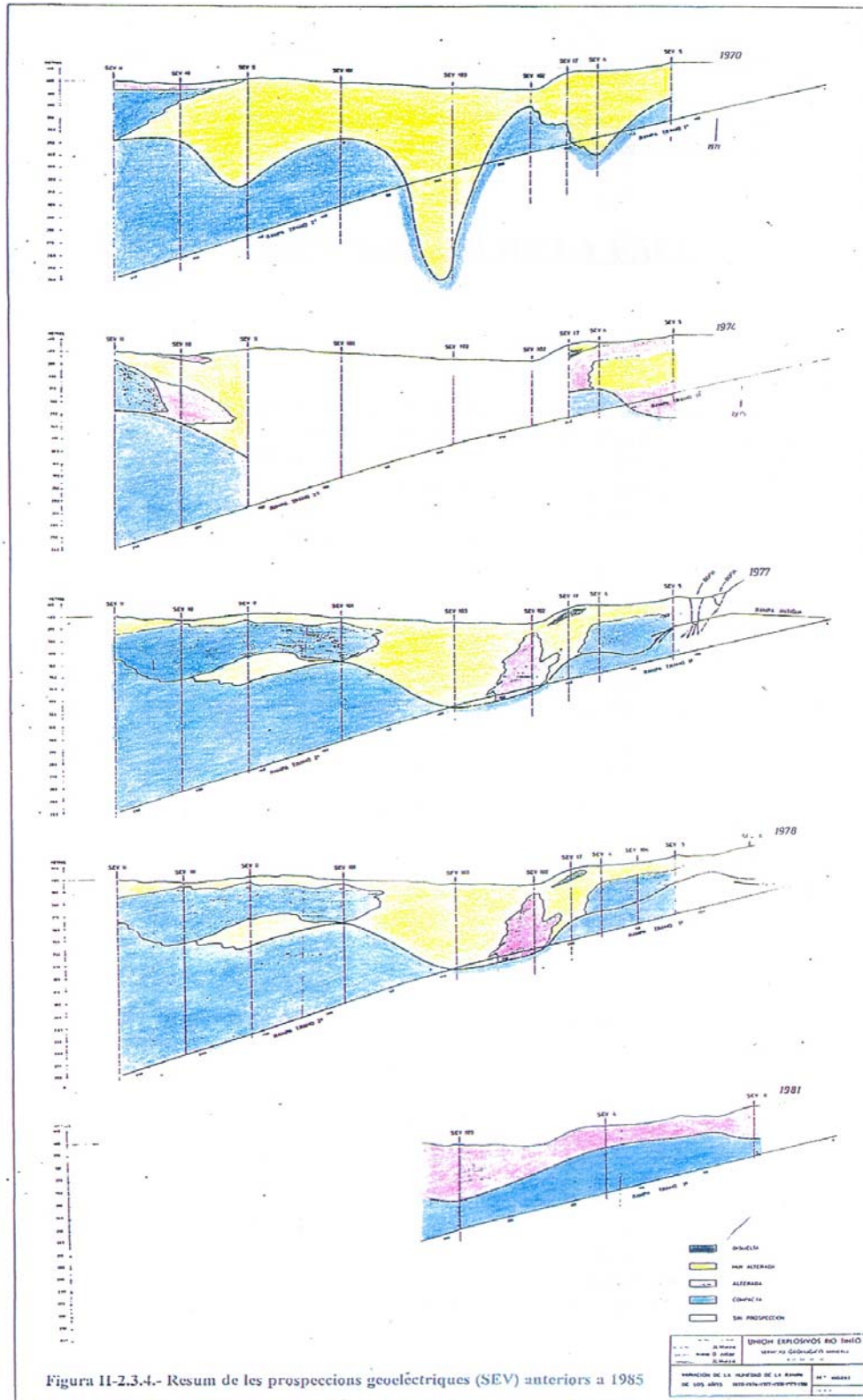


Figura núm. 55. Resum de les prospeccions geolèctriques (SEV) anteriors al 1985 (extret de Unión Española Río Tinto 1981)

### 3. RESULTATS HIDROGEOOLÒGICS

Malgrat aquesta informació, s'ha considerat interessant repetir els SEV i reinterpretar els gràfics dels quals hi ha còpia. En la interpretació dels SEV és molt important ajustar els valors de la resistivitat, ja que pel principi de l'equivalència es pot interpretar una profunditat totalment diferent. Per aquesta raó s'ha recopilat la màxima informació de la campanya del 1985, que es detalla a continuació.

L'equip geoelectric utilitzat constava de:

- Mil·livoltímetre GEOTRON mod. Geo-300 de les característiques següents:
  - Interval de mesura: 11, d'1 mV a 100 V de fons d'escala (seqüència: 1, 3, 10, 30, etc.).
  - Precisió: 1 %
  - Lectura mínima: 0,1 mV
  - Marge de temperatura: de -55 °C a 100 °C
  - Impedància d'entrada: 105 M
  - Rebuig a AC: de 80 db a 50 Hz
  - Compensació: dispositiu per a l'anul·lació de corrents de 0 a 300 V en qualsevol interval
  - Alimentació: bateries de mercuri de 15 V
  
- Mil·liamperímetre GEOTRON de les característiques següents:
  - Marges de mesura: 30, 100, 300, 1.000 i 3.000 mA
  - Precisió :  $\pm 1$  %
  - Selector de tensió de sortida pels elèctrodes A i B de: 50, 100, 150, 200 300 i 400 V.

Les conclusions a què es va arribar són:

Existeix una zona de resistivitat de 2 ohm-m amb desenvolupament E-O i situada al sud de la vall i a una profunditat superficial de 3 m a 10 m.

Una segona zona de resistivitat d'entre 2 i 5 ohms-m amb direcció fluctuant, però amb tendència E-O i situada al centre de la vall. Té una profunditat de 9 a 30 m. S'esmenta que hi ha una zona més conflictiva sobre la rampa i amb un desenvolupament aparent de 50 m.

Hi ha una tercera zona anòmala desenvolupada a la zona nord, de resistivitat de 5 ohms-m i una profunditat mitjana de 36 m a 44 m.

Però el que té més valor històric per a la valoració amb la geofísica realitzada en l'actualitat són els SEV que s'han fet sobre la rampa.

El resultat de la síntesi que s'ha fet amb els SEV esmentats i amb la informació paral·lela aconseguida es pot veure a la figura núm. 56.

### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

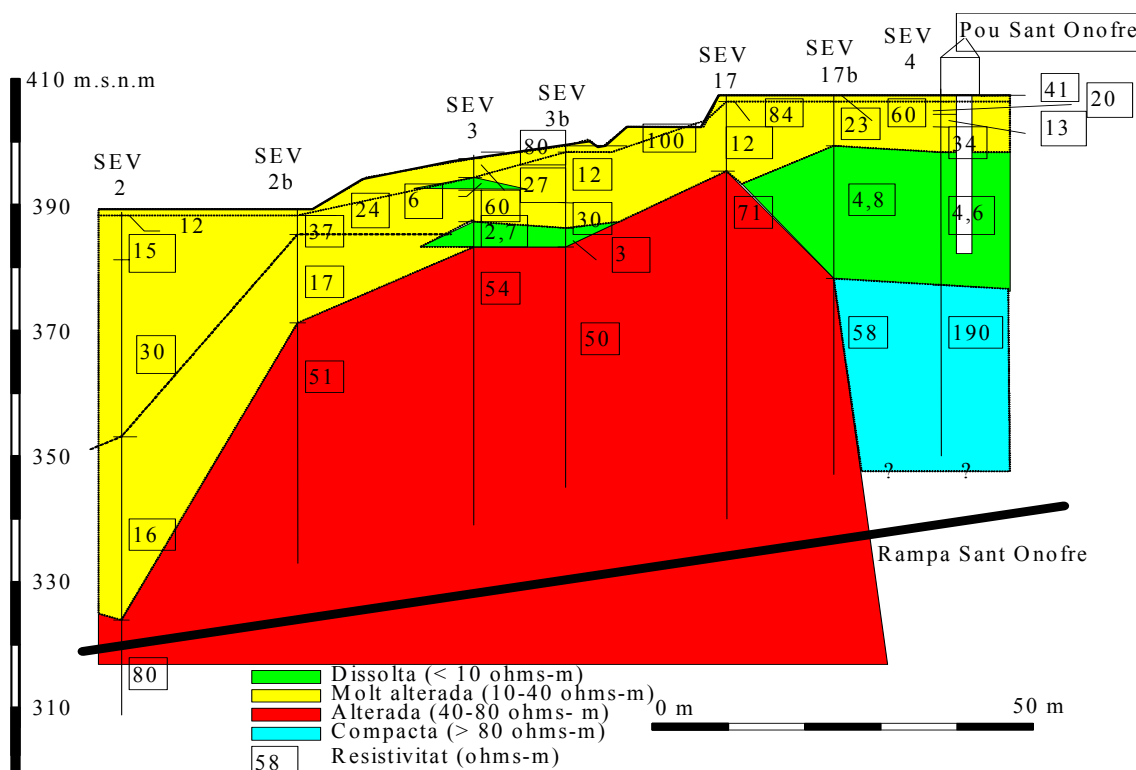


Figura 56. Secció geofísica (SEV) sobre la rampa de Sant Onofre. Reinterpretació de l'any 1985

Les conclusions concretes dels SEV sobre la rampa de Sant Onofre que es van fer el 1985 són:

- Sota els SEV 4 i 17b apareix una capa bastant potent de resistivitat inferior a 10 ohms-m que indica la presència d'aigua salada. Aquesta dada geofísica contrasta amb l'accident de l'entrada d'aigua a la mina el maig del 1985.
- Sota els sondejos 3 i 3b hi ha una capa de la mateixa naturalesa que l'anterior, però molt més prima.
- Sota el SEV 2 hi ha una zona dissolta a molta més profunditat que incideix directament sobre la rampa. Aquesta zona es considera de gran perillositat, ja que no hi ha cap altra zona de resistivitat aparent superior a 40 ohms-m. L'explicació podria ser que aquesta zona rebia les aigües de percolació del rec dels Fangassos i les aigües fecals del col·lector trencat de Cardona.

#### Sondeig paramètric

De la mateixa manera que s'han repetit els mateixos sondejos als mateixos indrets per treure conclusions sobre la profunditat, també es va realitzar un SEV paramètric en un indret en què es coneixia la columna estratigràfica. Es va intentar d'aquesta manera conèixer la resistivitat aparent dels diferents estrats de la vall Salada.

La metodologia emprada ha consistit a fer un SEV al mateix indret en què es va realitzar el sondeig mecànic número 6 en la campanya de prospecció realitzada per Geotecnia l'octubre del 1984 per SGAB-ACSA. La columna estratigràfica era fins als 20 metres i s'arribava fins a la sal compacta, passant per un metre de sal alterada o recristal·litzada entre els 17,5 m i els 18,5 m.

Els resultats d'aquest assaig no són definitoris, ja que la interpretació feta amb l'ajuda del programa informàtic Resix, quan es fa servir un ajust del 13 % per a les capes més importants, és a dir, per sota del nivell freàtic, per al metre de



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

sal recristal·litzada i amb un sòcol format per la sal compacta, dona els valors que s'expressen a la taula núm. 19 següent:

Nivell	Sondeig mecànic (m)	Profunditat segons el SEV (m)	Resistivitat (ohms-m)
Nivell freàtic	1,3	2,52	117
Sorres i argiles	1,3-17,5	2,5-24,3	2
Sal recristal·litzada	17,5-18,5	24,3-26,6	6
Sal compacta	18,5-∞	26,6-∞	20.000

**Taula núm. 19. Resultats i comparació geoelectrica pel sondeig paramètric**

Els valors de les resistivitats trobades estan dintre dels valors que els tècnics de les mines donen com a valors constatats (segons l'*Informe de recopilación de agua en la rampa de Sant Onofre* 1985). Aquests valors són (vegeu la taula núm. 20):

Tipus de sal	Resistivitat (ohms-m)
Sal dissolta	< 10
Sal molt alterada	10 – 40
Sal alterada	40 – 80
Sal compacta	> 80

**Taula núm. 20. Recopilació de les resistivitats dels materials (Unión Explosivos Río Tinto 1981)**

#### *Campanya geoelectrica del 1997*

En l'entorn de la vall Salada s'hi han dut a terme darrerament tres campanyes de prospecció, les quals s'han fet on han aparegut problemes relacionats amb les entrades d'aigua a les mines. La de l'any 1997 es va fer a la mateixa vall Salada, a la zona dels Fangassos; la de l'any 2003, amb motiu dels col·lapses apareguts a la llera del Cardener, es va realitzar pels voltants d'aquests col·lapses més importants, entre la caseta de l'autobús i la colònia Manuela, així com a la mateixa llera del riu davant la fàbrica La Plantada. El motiu era l'emplaçament d'un pou per reduir l'entrada d'aigua a la mina Las Salinas. La darrera campanya geoelectrica es va realitzar durant l'estiu del 2004 a fi d'esbrinar el camí que fa l'aigua fins a la rampa de Sant Onofre.

#### *SEV a la vall Salada*

La campanya de prospecció que es va realitzar el 1997 va consistir a repetir aquells SEV emplaçats sobre la rampa i dels quals es disposava de la gràfica i la seva corresponent interpretació. D'aquesta manera es podria repetir l'experiència fent servir les mateixes resistivitats i trobant les profunditats modificades, si s'esqueia, amb la qual cosa es podria avaluar el possible avançament d'alteració de les capes suprajacents.

Amb aquesta intenció es van seleccionar els emplaçaments corresponents als SEV número 2, 2b, 3 i 17b, ja que els SEV 3 i 3b, igual que el 17b i 4, estaven molt a prop els uns dels altres, i a més, com el 17, el seu emplaçament podia estar afectat per accidents actuals del terreny. Per altra banda, considerant com era d'accidentat del terreny després dels 200 metres d'AB/2, justament quan es detecten les profunditats més interessants, no hi havia possibilitat de fer recorreguts diferents.

Per a la campanya actual es van fer servir els mateixos aparells que es van utilitzar el 1985, marca GEOTRON model 300, amb una font d'alimentació composta per una sèrie de piles de corrent continu que arribava fins als 400 V, amb una longitud d'ales AB fins als 1.000 metres de longitud.

Es va fer servir el dispositiu tetraelectròdic Schlumberger simètric, amb el qual es desplacen els elèctrodes d'injecció de corrent elèctric *A* i *B* distàncies simètriques des del punt que es vol sondejar, deixant constants els punts *MN* de lectures dels mil·livolts. Quan aquestes mesures de diferència de potencial no són possibles, es separen els elèctrodes *MN* a fi de poder interceptar un flux més elevat. Amb aquests salts es produeixen uns desacoblaments de les corbes de resistivitat, per la qual cosa es repeteixen uns valors a fi de paral·lelitzar les corbes corresponents.

Aquesta metodologia es va anar repetint en els diferents SEV fins que la topografia canviava molt i no era factible prolongar més (vegeu l'emplaçament a la figura núm. 57). Els resultats dels SEV realitzats es poden veure a la secció geofísica sobre la rampa de Sant Onofre, en la figura núm. 58.

### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

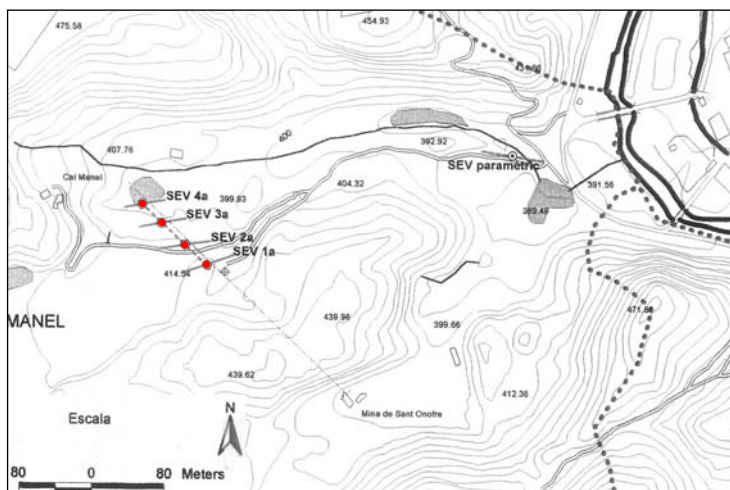


Figura núm. 57. Emplaçament dels SEV realitzats el 1997, a semblança dels realitzats anteriorment, del 1985

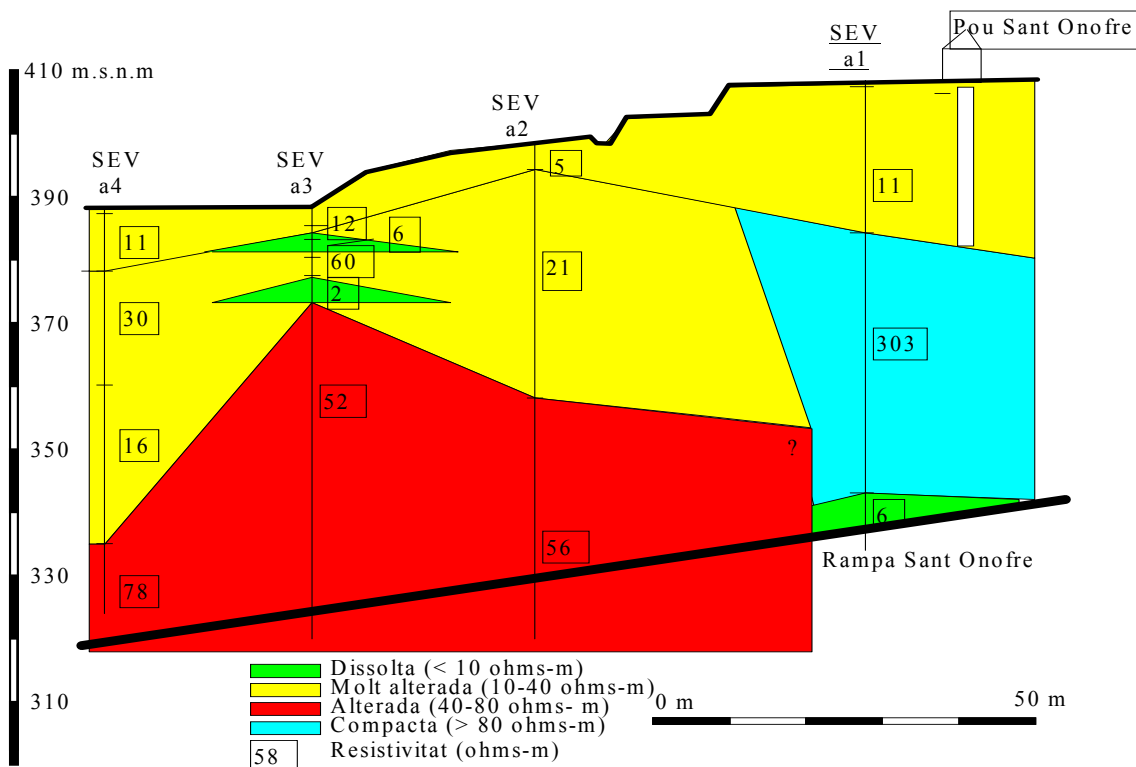


Figura núm. 58. Secció geofísica (SEV) sobre la rampa de Sant Onofre en 1997

Els resultats obtinguts amb la geofísica actual, considerant sempre el caràcter aproximatiu del mètode geolèctric, porten a formular les explicacions següents:

Sota el sondeig elèctric vertical actual número 1 (SEV a1) hi ha una zona a molta profunditat, pròxima a la rampa de Sant Onofre, amb un material de baixa resistivitat corresponent a material dissolt. Al mateix temps, i sobre el material esmentat anteriorment, es manté el paquet considerable de sal compacta. També s'observa que actualment ha desaparegut el nivell de sal dissolta (de color verd a la figura 58), fet que pot ser degut al drenatge del sistema del pou de Sant Onofre.

### 3. RESULTATS HIDROGEOOLÒGICS

Sota el SEV a2, fins a uns 40 metres de profunditat, hi ha uns materials amb resistivitat de 21 ohms-m que corresponen a sal molt alterada. A continuació hi ha un paquet molt gruixut, fins als 130 metres, en què ja hi ha els materials denominats *sal compacta*.

Sota el SEV a3 s'ha pogut ajustar gairebé amb les mateixes resistivitats que els SEV històrics, i sobresurten els dos nivells de materials dissolts, a menys de 15 metres de profunditat, ja detectats el 1985 però desplaçats més cap al nord. A continuació encara hi torna a haver una capa de material alterat.

Sota el SEV a4, en què també s'ha pogut ajustar amb les mateixes resistivitats històriques, apareixen encara uns materials amb resistivitat baixa, de l'ordre dels 16 ohms-m, molt profunds gairebé fins a la rampa. Aquesta zona cal recordar que coincideix amb els aiguamolls dels Fangosos.

#### ***Conclusions geoelèctriques de la vall Salada***

Primerament s'ha de considerar la relativitat del mètode de prospecció geoelèctrica: els seus resultats són aproximats i s'han de considerar globalment.

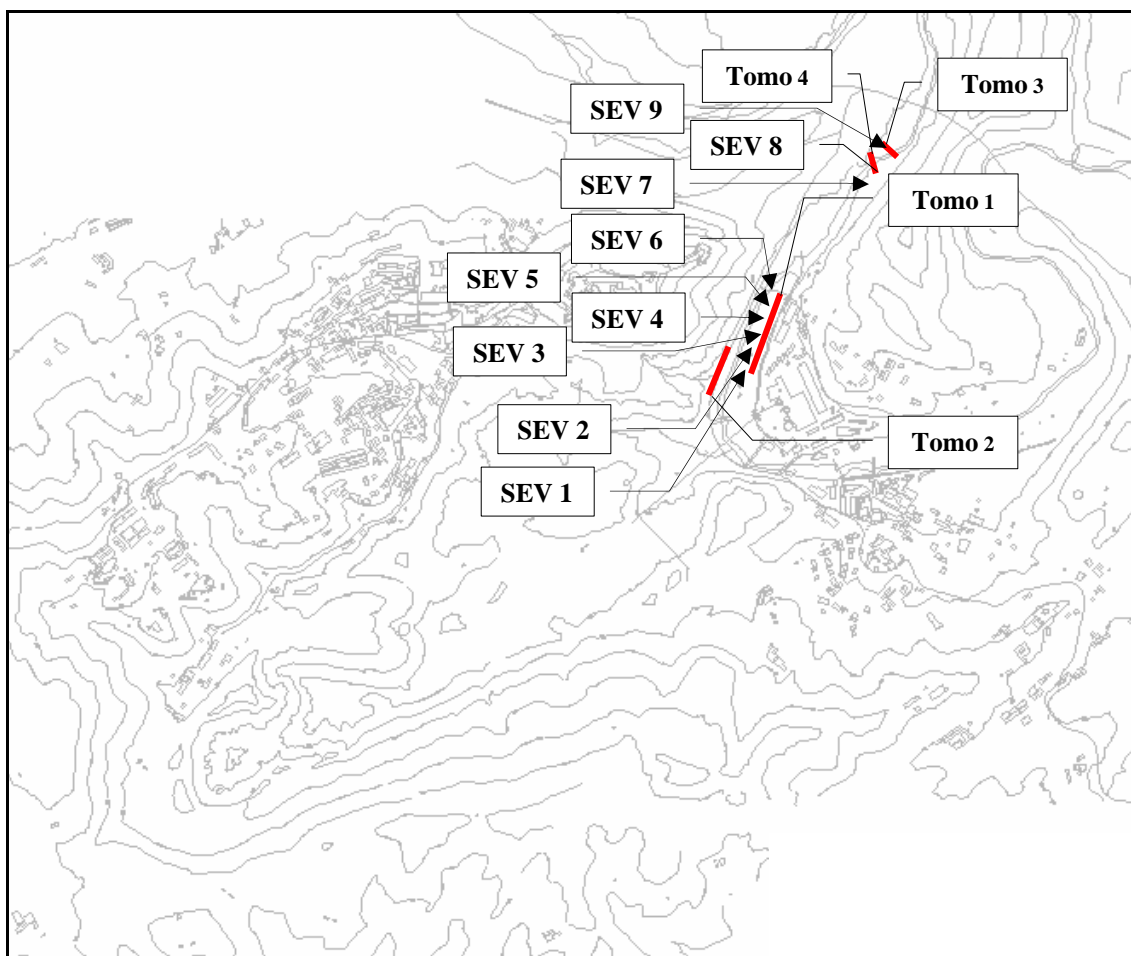
Les observacions de les campanyes geofísiques històriques i actuals, resumides en els gràfics de les seccions geofísiques anteriors, aporten els punts següents:

- Anteriorment, el 1985, es detecta una zona a l'entorn dels Fangassos en què hi ha una intrusió de sal alterada i molt alterada que va des de gairebé la superfície fins a profunditats per sota de la rampa de Sant Onofre.
- Sota la zona del SEV a1, al costat del pou de Sant Onofre, s'observa una zona de material dissolt sota un paquet potent de sal compacta i lleugerament per sobre de la rampa.
- Sota el SEV 2a ha augmentat fins a duplicar-se la profunditat del material molt alterat.
- Sota el SEV 3a apareixen dos nivells superficials a menys de 15 metres de materials dissolts. Aquest nivell de 12-15 metres en les proximitats d'aquesta zona també és detectat per la prospecció amb georadar.
- Sota el SEV 4a continua molt semblant el paquet considerable de materials molt alterats sota els Fangassos, que gairebé arriba a la mateixa rampa. El resultat concret és que fins i tot la cota on es troba el material molt alterat ha pujat uns 10 metres, encara que l'explicació pot ser molt bé la poca precisió del mètode georesistiu.

#### ***Campanya geoelèctrica del 2003***

La campanya de geofísica realitzada el 2003 (vegeu figura núm. 59), la va dur a terme el Grup de Prospecció Geofísica de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Es va fer en dos temps: el novembre i el desembre del 2003.

### 3.3.1. Prospecció geològica



**Figura núm. 59. Emplaçament de les diferents prospeccions realitzades el 2003 (a partir de dades d'ICC 2003)**

Tant els sis SEV (vegeu figura núm. 60) com el perfil de tomografia elèctrica TOMO-1 indiquen un primer nivell superficial (fins als 5-7 m) caracteritzat per una capa de sòl superficial heterogeni al qual segueix un nivell de poca potència de graves. Per sota d'aquestes capes s'ha detectat una electrocapa conductora que es podria interpretar com un nivell de gresos que contenen aigua parcialment salinitzada. En el perfil TOMO-1 (vegeu figura núm. 61), a més d'aquests trams salinitzats, s'aprecien dues anomalies d'altres resistivitats, centrades en els 95 m i 165 m lineals, que es podrien interpretar com a llocs amb presència de sal o com a possibles cavitats.

En aquest cas el perfil de tomografia elèctrica TOMO-2 (vegeu figura núm. 62), només mostra un primer nivell superficial (fins als 5-7 m) caracteritzat per materials salinitzats, on la distribució de les baixes resistivitats podria marcar probables direccions preferents de flux. A l'entorn dels 80 metres lineals s'aprecia una anomalia amb alta resistivitat, segurament associada a la presència d'una cavitat.

El rang de resistivitats dels perfils TOMO-3 (vegeu figura núm. 63) i TOMO-4 (vegeu figura núm. 64), realitzats a la llera del Cardener davant la colònia La Plantada, mostra que en aquest sector investigat predominen els gresos; a la part central, coincidint amb el curs del riu, es detecta una zona d'altres resistivitats que es podrien interpretar com un estat de fissuració del material, fet que defineix una direcció preferent de flux transversal que es va aprofundint.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

En la mateixa zona, la correlació entre electrocapes evidencia una forta discontinuïtat lateral entre el SEV-8 i el SEV-9 (vegeu figura núm. 61), que es pot interpretar com una zona de trencament o de contacte bruscat. Són precisament els resultats geofísics d'aquest indret que es van fer servir per recomanar la realització d'un pou de captació d'aigua. A causa d'aquesta discontinuïtat, es fa difícil establir una relació fiable entre els valors de les resistivitats i la corresponent interpretació litogràfica, de manera que la que es proposa en el tall s'ha de prendre tan sols de manera orientativa.

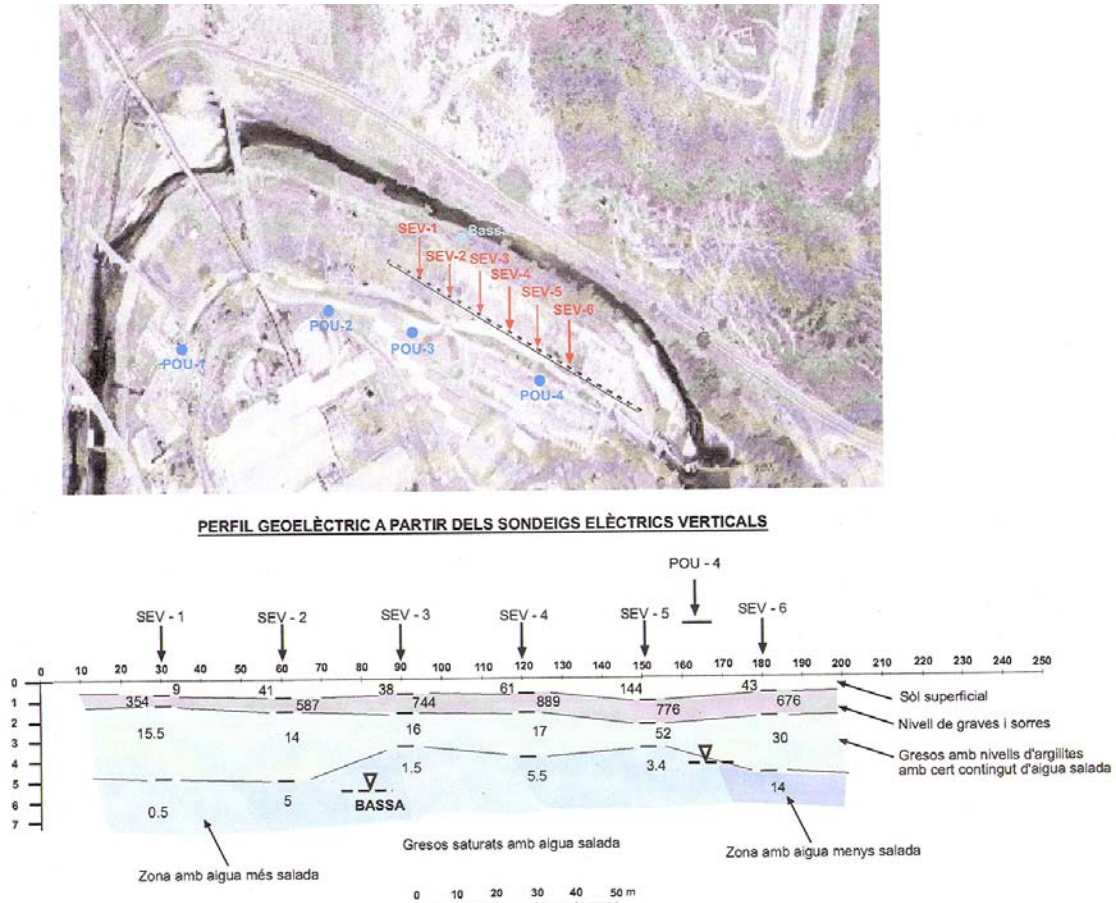


Figura núm. 60. Interpretació dels SEV de l'1 al 6, alineats i paral·lels a la llera del riu (ICC 2003a)

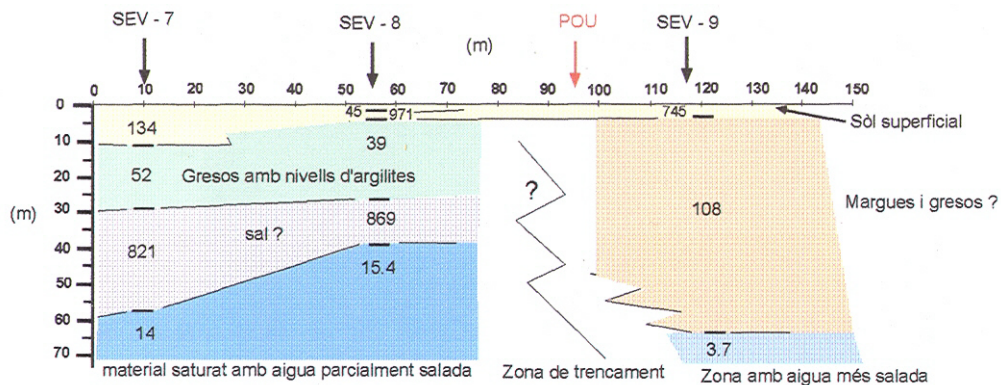
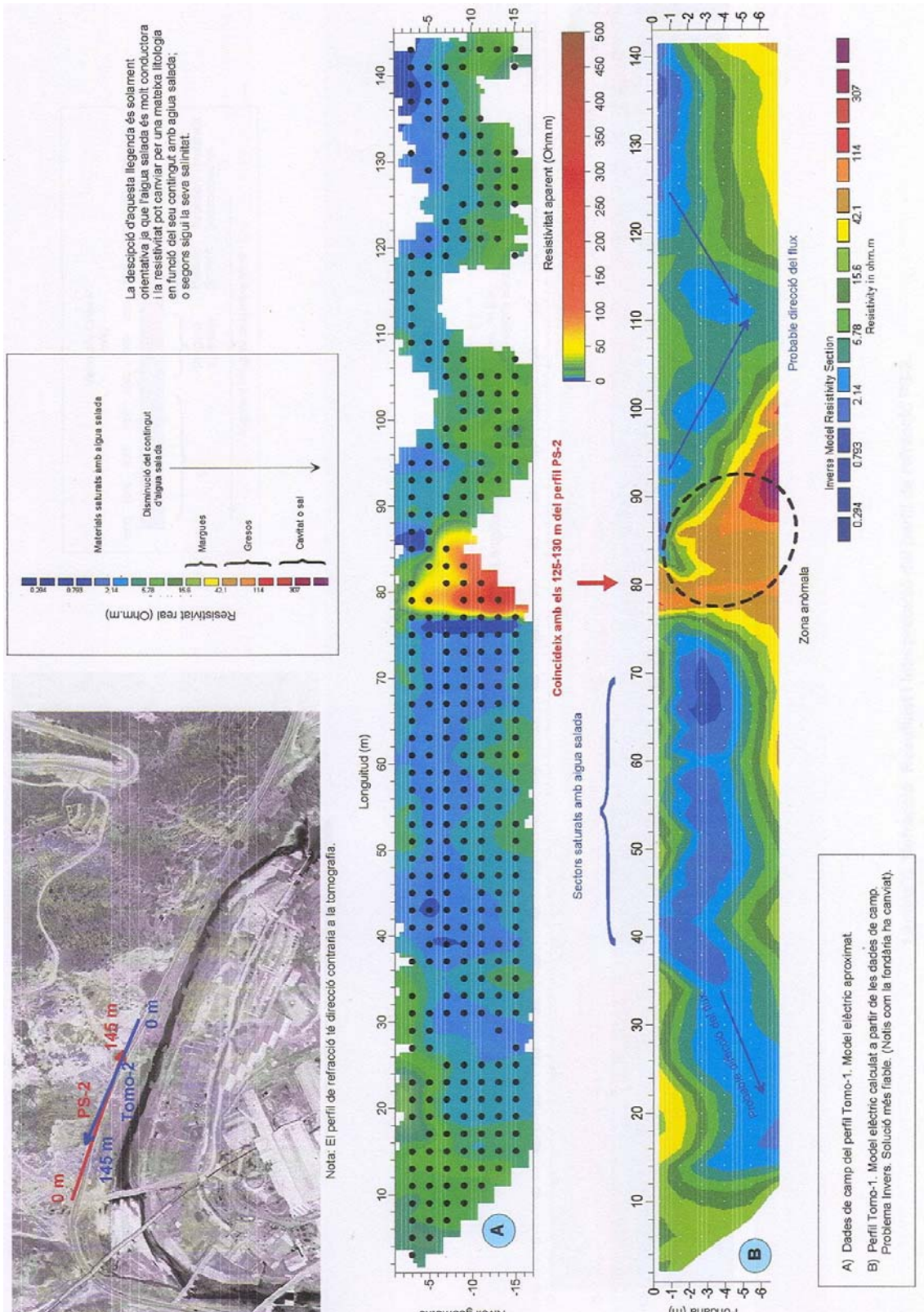


Figura núm. 61. Interpretació dels SEV 7, 8 i 9 també alineats al riu i situats davant la colònia la Plantada. Aquesta secció va servir per emplaçar un pou a la zona en què presumiblement hi havia una discontinuïtat d'estrats georesistius (ICC 2003a)



### 3.3.1. Prospecció geolèctrica



**Figura núm. 62. Resultats i interpretació del perfil TOMO-1. També s'hi han emplaçat els SEV (ICC 2003a)**



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

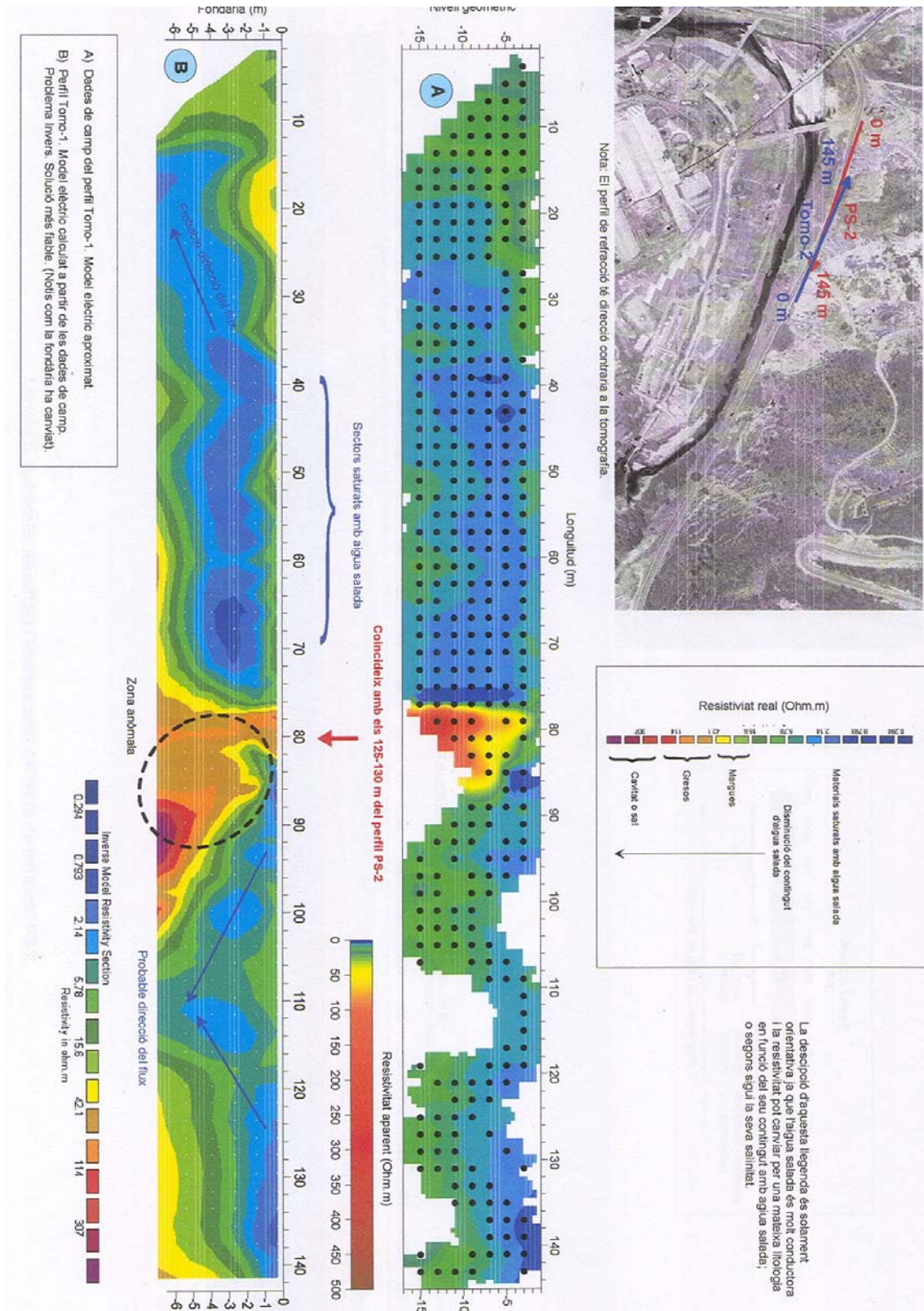


Figura núm. 63. Resultats i interpretació del perfil TOMO-2 (ICC 2003a)

### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

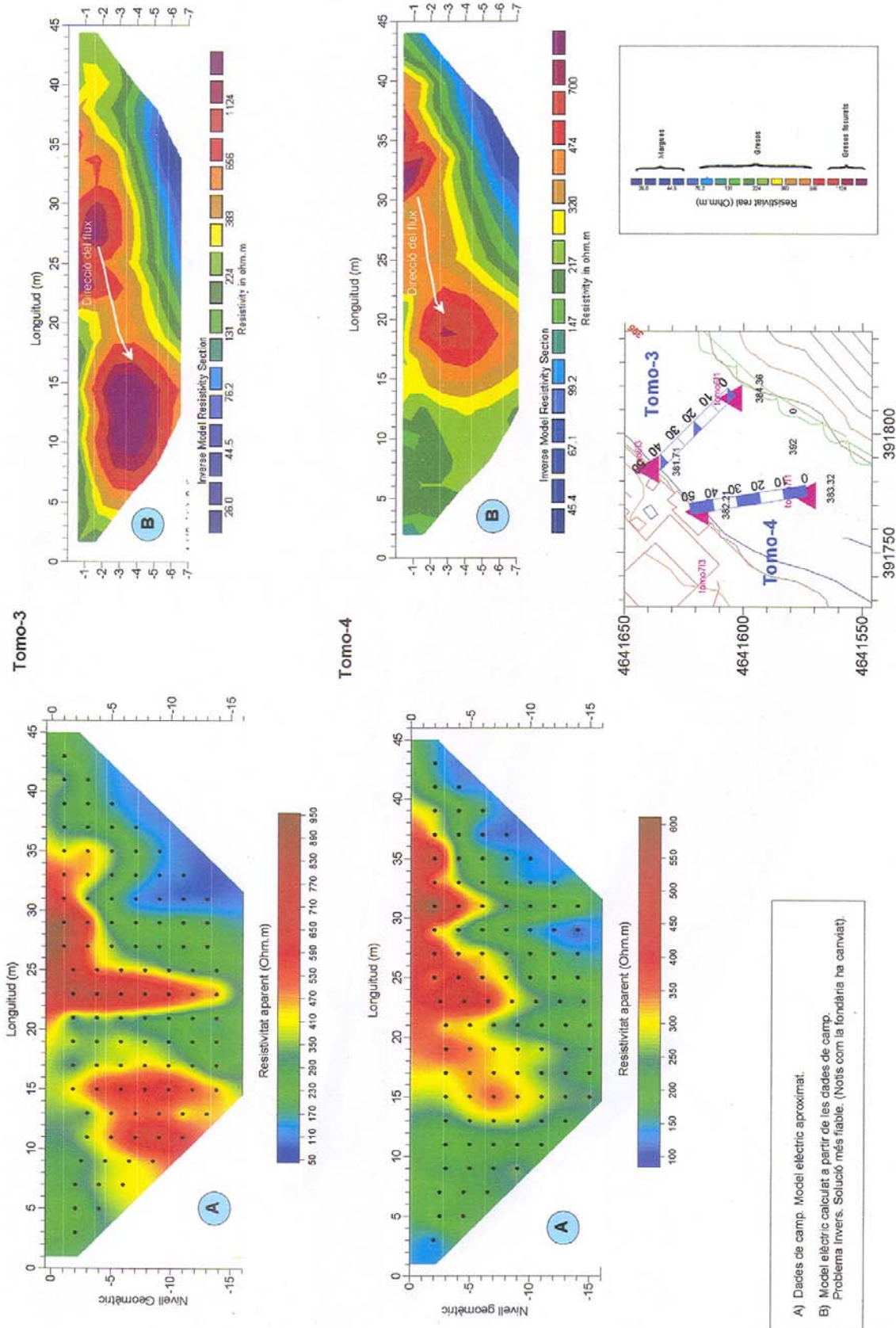


Figura núm. 64. Resultats i interpretació del perfil TOMO-3 i 4 a la zona de la colònia la Plantada (ICC 2003a)



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

#### Campanya geolèctrica del 2004

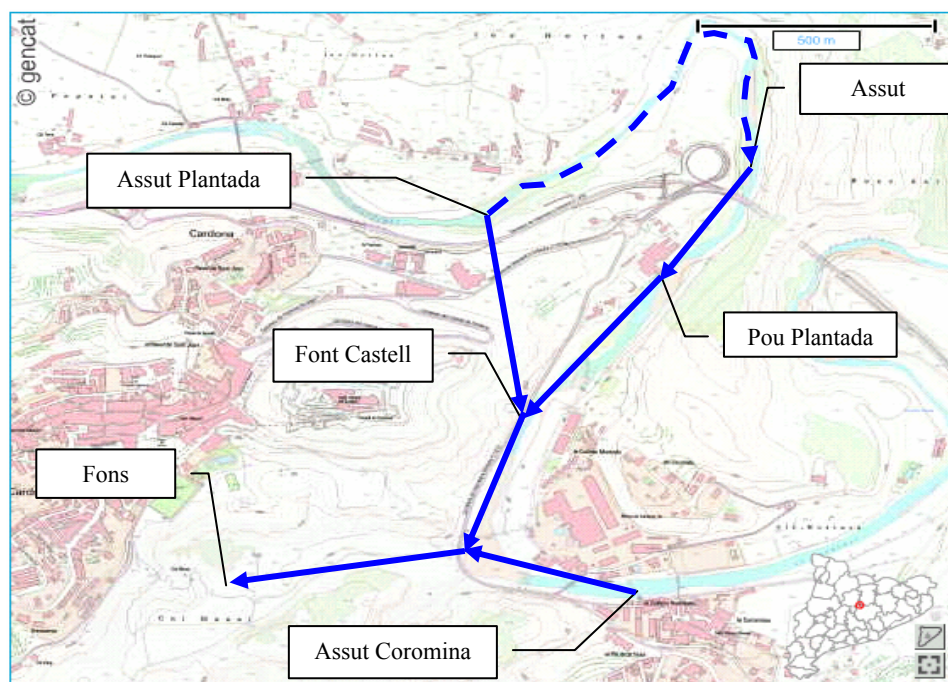
Davant la hipòtesi que hi havia una entrada d'aigua subterrània lateral que no provenia directament de la derivació del riu Cardener a través del túnel construït l'any 2000, s'han realitzat darrerament una sèrie d'experiències geolèctriques encaminades a demostrar l'existència d'altres accessos (vegeu la taula núm. 21 i la figura núm. 65). A través de fotografia aèria ja es va detectar una falla important que comunicava el riu Cardener, entre l'indret de l'assut de derivació de la Plantada i la llera del mateix Cardener, a l'altura de la parada d'autobús davant la colònia Manuela de la Coromina.

El resultat de l'experiència de la determinació del flux geolèctric, segons el mètode de posada a massa o de potencial artificial, entre la surgència de l'aigua del fons de la rampa de Sant Onofre i altres indrets, va ser el que s'expressa a la taula núm. 21.

		Fons mina			
		Distància subterrània	mA	mV	R=V/I
1	Font Castell	900	500	140	0,28
2	Pou Plantada	1.350	1.000	480	0,48
3	Túnel riu	1.850	200	190	0,95
4	Coromina	1.800	150	90	0,60
5	Assut	1.750	500	260	0,52
6	Assut (seguint tot el riu)	5.150	500	260	0,52

**Taula núm. 21. Resultats de les resistivitats aparents pels suposats trajectes que pot seguir el flux d'aigua subterrani que arriba al fons de la mina (rampa de Sant Onofre)**

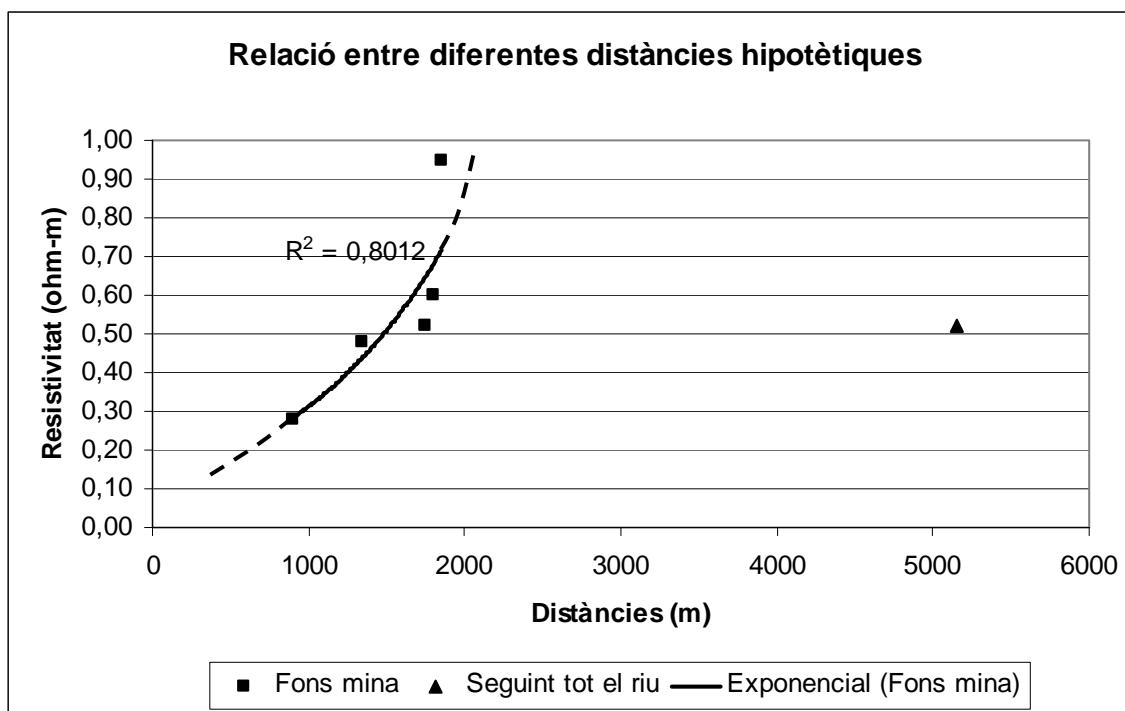
Les distàncies hipotètiques que s'han considerat per al desplaçament del flux subterrani, des dels diferents orígens fins al fons de la mina, és a dir, al fons actual de la rampa de Sant Onofre, estan representades en el mapa de la figura núm. 65.



**Figura núm. 65. Localització de les diferents zones en l'experiència de la determinació del flux geolèctric per determinar camins preferents de les aportacions d'aigua a la rampa de Sant Onofre**

### 3.3.1. Prospecció geolèctrica

S'ha considerat que hi ha un flux subterrani preferent que segueix la falla de sota el castell (cartografiada mitjançant fotografia aèria), que comunica la llera del riu Cardener directament amb la llera seca aigües avall de l'assut del túnel, sense passar per la corba del riu del NE del castell. Si la resistivitat aparent que es troba des de l'assut de la Plantada fins al fons de la mina fos fruit de passar per tota la traça del riu, la relació entre la distància i la resistivitat aparent estaria fora de la corba d'ajust dels punts de l'experiència realitzada (vegeu figura núm. 66).



**Figura núm. 66. Comportament geolèctric entre la surgència d'aigua salada a la rampa de Sant Onofre i diferents hipòtesis de recorregut de l'aigua subterrània, punts en forma de quadrats. El punt representat per un triangle correspon a tot el recorregut que representaria seguir el traçat superficial del riu**

La conclusió a què s'arriba amb aquesta experiència de prospecció geolèctrica de posada a massa o de potencials artificials és que és molt factible l'existència de dos fluxos laterals d'aigua subterrània que porten aigua fins al fons de la rampa de Sant Onofre. Els seus orígens són dos: un prové del nord, del riu Cardener i d'aigües amunt de la seva corba del nord-est, i l'altre prové del sud-est, d'aqüífers penjats que formen els estrats més competents, com són els gresos que cobreixen la formació salina. Aquests fluxos subterranis estan conduïts per l'existència de falles: el flux del nord segueix la falla que hi ha entre el castell i l'actual llera seca del riu, i el flux del nord-est passa per la possible falla deduïda a la llera del Cardener a l'alçada de la Coromina.

### 3.3.2. Georadar

#### *Introducció*

En aquest estudi es presenten els resultats obtinguts en la prospecció geofísica mitjançant tècniques de georadar de subsòl, emprat, per una banda, en la determinació de bosses de salmorres a la vall Salada i, per l'altra, per detectar els contactes de la sal amb els altres materials a sota de l'antiga llera del Cardener.

S'ha de considerar que l'aplicació del georadar en tasques mineres (Daniels et al. 1992) i en la determinació de reserves en dipòsits subterranis (Benson i Yuhr 1992), així com en els treballs de prospecció de buits o de contactes en dipòsits salins a poca profunditat, ha donat bons resultats.

#### *Georadar a la vall Salada*

A continuació s'exposa la metodologia i els resultats obtinguts en la campanya del 1997, dintre de l'informe relatiu a hidrogeologia fet per la UPC per a la Junta de Residus de la Generalitat de Catalunya.

#### *Plantejament dels treballs*

Els treballs de planificació de camp (localització *in situ* dels llocs d'interès, etc.) de la campanya d'aplicació del georadar es van dur a terme durant la primera setmana de maig, i els perfils es van fer el dia 15 de maig de 1997.

La longitud total dels perfils de georadar és de 1.065 metres, en un total de set perfils. El contingut de les figures és com segueix: figura ---. Plànol de la vall Salada amb indicació dels perfils de georadar i indicació posicional de les anomalies detectades pels perfils de georadar.

#### *Equips utilitzats*

- Equip de georadar digital d'enregistrament continu, model SIR 10 de la Geophysical Survey System Inc.
- Antena monoestàtica de 100 MHz de la Geophysical Survey System Inc.
- Software d'anàlisi de senyals de georadar RADAN III de la Geophysical Survey System Inc.

#### *Resultats obtinguts*

Aquesta secció s'inicia amb una sèrie de definicions que ajudaran a comprendre els comentaris als resultats dels radargrames dels perfils de georadar.

S'anomena *reflectors* aquells elements del medi analitzat que produeixen reflexió de l'energia electromagnètica emesa per l'antena del georadar (Ulriksen 1982). Aquestes reflexions es produeixen en canvis de medis i de materials quan presenten contrastos entre les seves propietats electromagnètiques, és a dir, la conductivitat i la constant dielèctrica (Lorenzo 1994). Els contrastos forts provocaran la reflexió d'un elevat percentatge d'energia; per tant, obtindrem registres de gran amplitud d'ona. Cal recordar que l'energia és proporcional al quadrat de l'amplitud d'una ona (García 1997).

S'anomena *reflectors forts* els contactes entre medis de paràmetres electromagnètics molt diferents, com poden ser els contactes entre un forat ple de salmorres o buits (Canas et al. 1996) i els materials al·luvials o salins (García et al. 1996) que, per exemple, es poden trobar en les primeres capes del subsòl de la vall Salada (Casas et al. 1996). Variacions de la humitat, de la compactació o del gra d'un mateix material produeixen canvis en les propietats electromagnètiques del medi, de manera que també poden ser observades en produir-se reflexions en les zones de transició (Halleux 1992).

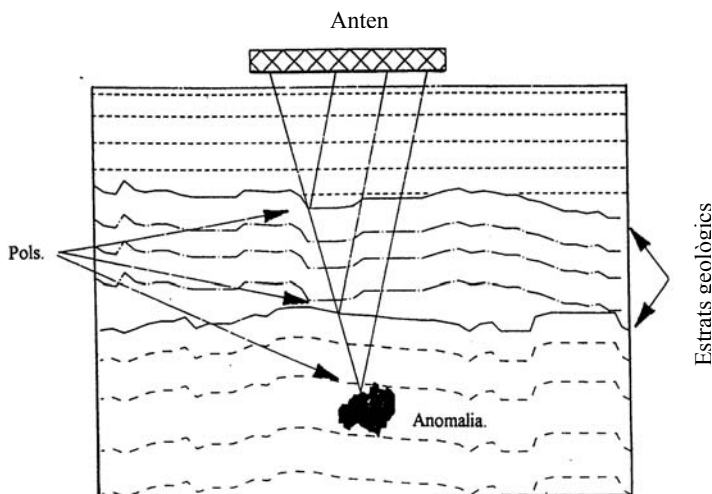
S'anomena *anomia* una variació del registre esperada per al cas d'un medi homogeni. L'anomia s'observa en el radargrama com un increment de l'amplitud de l'ona (augment de la intensitat de l'energia reflectida), corresponent a modificacions del medi estudiat o a canvis de materials en el trajecte de l'ona.

A continuació es comenten breument els principis de la prospecció geofísica mitjançant la utilització del georadar.

### 3.3.2. Georadar

El georadar emet polsos electromagnètics de molt curta durada, 1-60 ns ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ), a la banda d'UHF/VHF (20-1000 MHz), que es repeteixen amb una freqüència de 50 kHz.

Aquests polsos són agrupats en ones d'escombratge integrades per 1.000 a 15.000 d'aquests polsos. Quan mitjançant l'antena emissora es generen els polsos, aquests, en la seva trajectòria a través del subsòl, es poden trobar amb un canvi de medi o amb algun buit; el que realment es detecta és un canvi en les propietats elèctriques dels medis en què es propaguen. Això produeix que part de l'energia es reflecteixi i sigui recollida per l'antena receptora, mentre que la resta continua la seva trajectòria per l'interior del subsòl (vegeu la figura núm. 67).



**Figura núm. 67. L'antena del georadar capta les reflexions en diversos punts del subsòl (UPC 1997)**

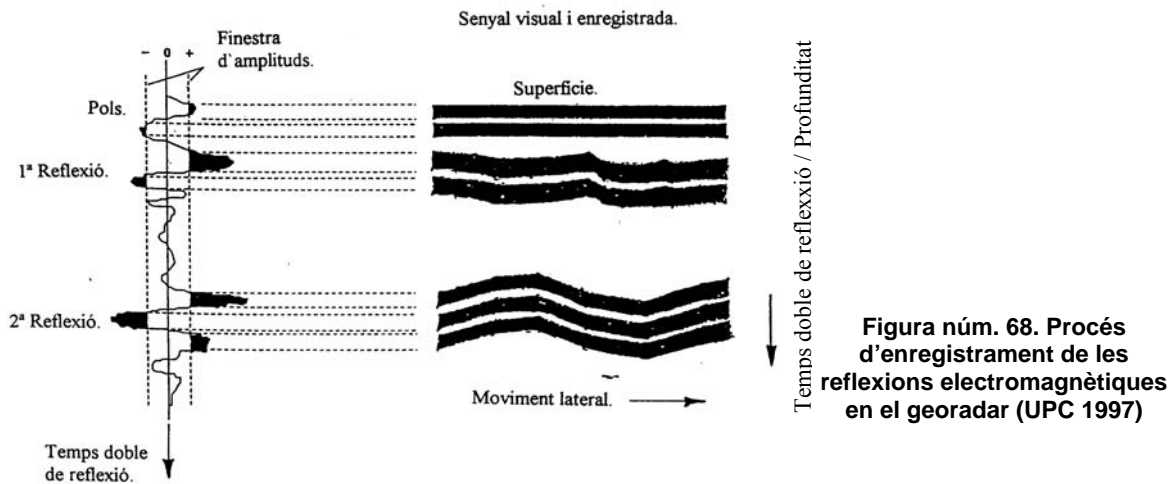
L'antena incorpora un circuit electrònic desmodulador, connectat al circuit electrònic d'amplificació i recepció. Quan arriben les reflexions, aquest circuit converteix el pols electromagnètic d'alta freqüència en un altre, en la banda d'audiofreqüència, que és enviat, a través d'un cable coaxial de 30 metres i altament apantallat, a la unitat central, on el senyal és reconstruït, processat i emmagatzemat.

La unitat central incorpora un sistema d'emmagatzematge massiu de dades i una pantalla de visualització on es reproduïx, en temps real, el senyal que li arriba.

Cada pols que es rep es materialitza en una traça. En moure l'antena sobre la superfície del terreny s'obté un registre continu que reflecteix l'estratigrafia o l'existència d'anomalies en el subsòl.

Quan el senyal es rep a la unitat de control, se li aplica una finestra d'amplituds, de grandària i color segons l'operador. Les amplituds que sobrepassen la finestra establerta es mostren a la pantalla amb diferents colors.

El resultat és un registre, anomenat *radargrama*, en què l'eix d'abscisses correspon al desplaçament de l'antena sobre el terreny, o moviment lateral, i l'eix d'ordenades reflecteix el temps invertit pel pols a recórrer el camí doble (antena-reflector-antena), també anomenat *temps doble de reflexió*. El temps es mesura en nanosegons (vegeu la figura núm. 68).



**Figura núm. 68. Procés d'enregistrament de les reflexions electromagnètiques en el georadar (UPC 1997)**

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

Si es troba la velocitat de propagació del medi investigat, o la seva constant dielèctrica relativa (Canas et al, 1996), l'escala vertical de temps es pot convertir en fondàries.

#### **Resultats obtinguts del perfil V1:**

El perfil V1 té una longitud total de 185 metres i una fondària d'investigació màxima de 45 metres.

Les anomalies atribuïbles a la presència de buits es manifesten entre els metres 22 i 30, començant a una fondària pròxima als 9 metres, i els seus efectes arriben fins als 27 metres de fondària.

Altres reflexions, atribuïbles també a la presència de buits, han estat enregistrades entre els 41 m i els 90 m del perfil. Es tracta de reflexions discontinues i de grandàries diverses, amb un inici variable entre els 7 m i els 11 m de fondària. Aquestes anomalies finalitzen entre els 25 m i els 40 m de fondària.

Les anomalies que es manifesten en el radargrama del perfil V1, entre els metres 152 i 180 del registre, amb formes similars i amb característiques de xemeneia de dissolució, són produïdes probablement per la infiltració d'aigua procedent de l'escolament del vessant. Les reflexions més intenses s'inicien aproximadament als 15 metres de fondària, i no s'arriba a determinar el seu final, ja que totes superen els 45 metres de fondària.

#### **Resultats obtinguts del perfil V2:**

El perfil V2 té una longitud total de 210 metres i una fondària d'investigació de 45 metres.

En el registre es presenten fortes anomalies situades entre els 20 m i els 80 m, que arriben fins als 45 m de fondària explorats. Podem distingir dos tipus d'anomalies diferents. Les primeres semblen produïdes per forats de dissolució; les altres, com per exemple les situades entre els 70 m i el 80 m i la que es troba a l'entorn dels 40 m de registre, per les seves característiques podrien tractar-se d'antigues galeries.

També s'han enregistrat petites reflexions als metres 108, 145, 165, 176, 183 a 188 i sobre el metre 209.

#### **Resultats obtinguts del perfil V3:**

El perfil V3 té una longitud de 135 metres i arriba a una fondària de 45 metres.

En tot el registre es poden apreciar anomalies superficials associades probablement a l'arrossegament i la dissolució de materials per l'escolament d'aigües.

A més fondària (uns 12 metres) observem una primera anomalia al metre 16. Al metre 41 també es pot apreciar una anomalia a la mateixa fondària.

Entre els metres 95 i 120, començant a uns 10 metres de fondària, es poden distingir petites anomalies de grandària reduïda.

#### **Resultats obtinguts del perfil V4:**

La longitud total del perfil V4 és de 360 metres i la fondària explorada de 45 metres.

El primer tram de registre (entre els 0 i els 10 metres) és fortament anòmal a partir dels 10 metres de fondària.

Entre els metres 10 i 20 es poden observar anomalies aïllades de poca grandària en una zona homogènia. Aquestes anomalies es presenten entre els 10 m i els 20 m de fondària i probablement es poden associar a buits.

Entre els metres 30 i 65 observem altres anomalies, una part de les quals són semblants a les anteriors, a uns 10 metres de fondària. Una altra sèrie d'anomalies comencen molt superficialment.

Aquests tipus de reflexions es tornen a trobar entre els metres 100 i 140. La darrera d'aquestes anomalies, situada entre els 135 m i els 140 m, per les seves característiques es podria associar amb una antiga galeria o excavació.

Entre els 140 m i els 190 m el registre és prou homogeni. Es tornen a trobar anomalies a partir del metre 190. Aquestes anomalies, tot i ser aïllades, tenen una continuïtat al voltant dels 10 metres de fondària, entre els metres 210 i el final del perfil.

A poc més de 300 metres també es troba una forta anomalia que comença en superfície, com també als 342 metres de distància.

### 3.3.2. Georadar

#### **Resultats obtinguts del perfil V5:**

La longitud total del perfil V5 és de 55 metres i assoleix una fondària de 35 metres.

El registre presenta anomalies superficials en tot el perfil, probablement degudes a arrossegament i dissolució de materials en el contacte entre la cobertora i el diàpir. Quan el perfil s'acosta al vessant (que se situa al final del registre), les anomalies superficials, existents a tot el registre, assoleixen més fondària. Aquest fenomen pot ser degut a l'origen dels fenòmens que causen les anomalies, l'escolament de les aigües pluvials pel vessant.

Cal destacar, entre els 24 m i els 30 m, una anomalia de grandària important localitzada a una fondària de 25 metres. Sembla que es tracta d'un buit de grans dimensions, una cavitat que es localitza a l'interior del diàpir salí.

Altres anomalies que es poden associar a petits buits i heterogeneïtats es localitzen entre els 45 m i els 50 m, a una fondària d'entre 10 m i 25 m.

#### **Resultats obtinguts del perfil V6:**

El perfil V6 és un perfil subterrani, traçat per l'interior de la Minilla de la Muntanya de Sal. Té una longitud de 90 m i assoleix una fondària de 40 metres.

Cal comentar les anomalies superficials, que poden arribar fins a una fondària superior als 5 metres. Les més fortes es troben entre els metres 60 i 70, encara que, amb menys intensitat, podem parlar de dues seccions d'aquestes anomalies: la primera entre els 35 m i els 90 m (amb el màxim d'intensitat on ja hem indicat), i la segona entre els 10 m i els 30 m.

A 10 metres trobem una anomalia de petita grandària localitzada a partir dels 15 metres de fondària, probablement un buit.

Altres petites anomalies estan situades a 20 metres de fondària, a distàncies de 50 m i 80 m.

#### **Resultats obtinguts del perfil V7:**

Igual que el perfil V6, aquest registre correspon a un perfil subterrani a l'interior de la Minilla de la Muntanya de Sal. Té una longitud és de 30 metres i assoleix una fondària de 45 metres.

S'observen les mateixes anomalies superficials que es comentaven en el perfil V6, i són molt més marcades entre els 10 m i els 30 m de distància. Al començament del perfil la fondària màxima és de 5 metres, però arriba als 10 metres cap al final del perfil (metre 30). És probable que aquestes anomalies es puguin associar a heterogeneïtats degudes a dissolució dels materials salins.

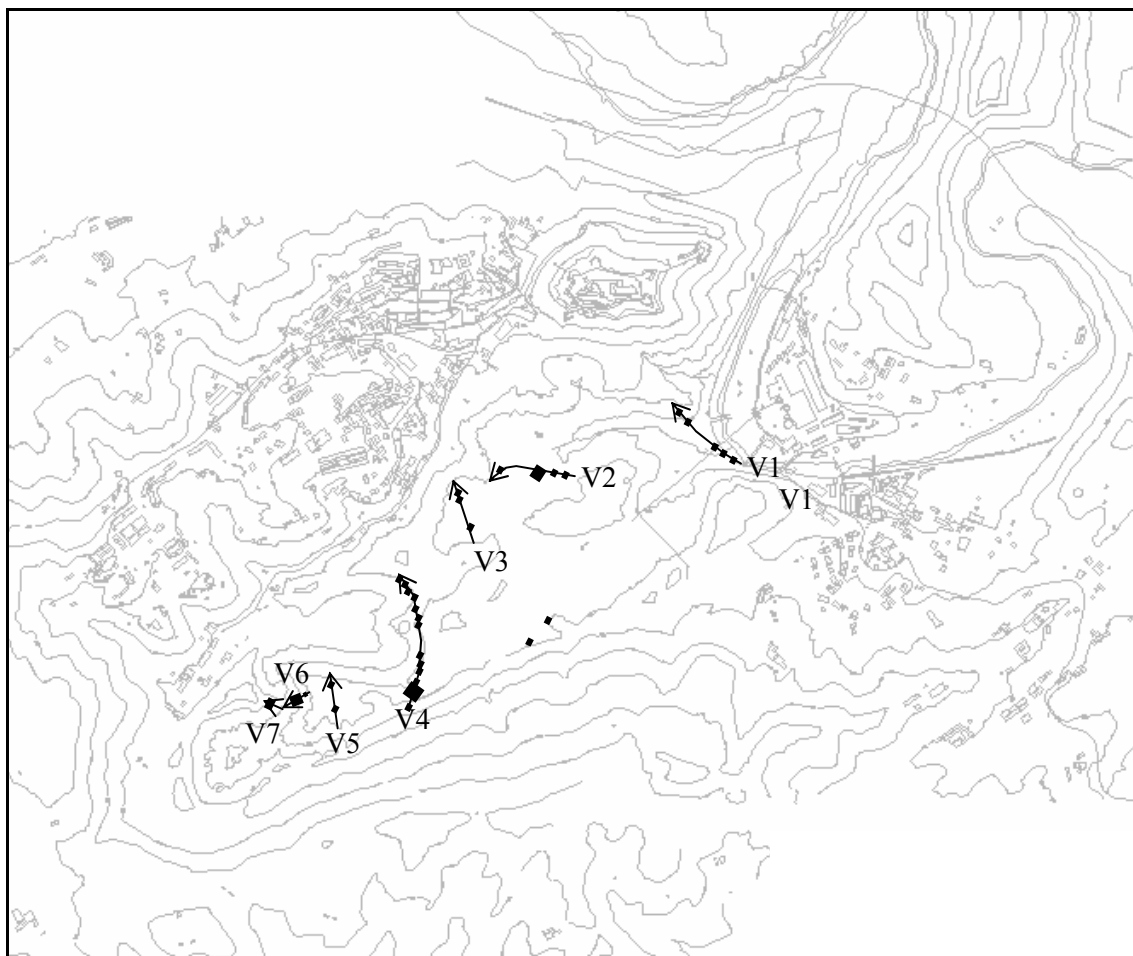
Al començament del perfil s'enregistren unes anomalies a partir dels 5 metres de fondària, que arriben fins als 35 metres de fondària.

Una altra anomalia important es localitza passat el metre 20 de distància, a uns 15 metres de fondària. Les característiques de la reflexió d'aquesta anomalia fan pensar en un buit de dimensions ja considerables.

#### ***Conclusions i recomanacions a la interpretació del georadar a la vall Salada***

L'aplicació del georadar ha permès determinar la posició d'anomalies degudes a buits formats per la dissolució dels materials. S'ha resumit en una figura la posició dels diferents emplaçaments dels radargrames, així com les anomalies detectades (vegeu la Figura núm. 69).

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



**Figura núm. 69. Emplaçament dels perfils aconseguits amb els radargrames i situació de les seves anomalies (a partir d'UPC 1997)**

La grandària dels buits és molt variable, igual com la seva fondària, encara que en alguns perfils semblen aparèixer a partir dels 10 metres de fondària i en alguns casos s'arriba fins als 45 metres explorats.

També s'han pogut detectar anomalies degudes probablement a antigues galeries i sectors del terreny que presenten una certa homogeneïtat.

Superficialment existeixen anomalies possiblement associades a humitats i a arrossegament i/o dissolució de materials per aigües superficials, en el possible contacte entre la cobertura argilosa i els materials salins del diapir.

#### *Georadar al peu de la Muntanya de Sal*

A la Muntanya de Sal hi havia la Minilla, que anava des de la plaça que hi ha al peu de la muntanya fins al pou Teresa. Després d'haver-la condicionat per a visites turístiques, es va considerar necessari reforçar-la i mantenir-la per qüestions de seguretat i també ampliant-la amb una altra mina d'accés o d'evacuació. Aquestes diferents operacions requerien el pas de maquinària pesada per la plaça, ja que calia sanejar i col·locar perns d'ancoratge per al sosteniment de la volta. Per aquest motiu el 1995 es va sol·licitar una campanya de georadar per determinar cavitats en el subsòl de la plaça. Aquest treball va ser sol·licitat a la UPC (Canas et al. 1996).

### 3.3.2. Georadar

#### ***Plantejament dels treballs***

Abans d'aplicar les tècniques de georadar, es van realitzar dos experiments al laboratori a fi d'augmentar la precisió en la interpretació de dades. El primer va consistir en la determinació del valor mitjà de la constant dielèctrica del medi salí, que va resultar de 5,5. Gràcies a aquesta constant es va poder determinar la velocitat de transmissió de l'ona generada per l'antena del georadar en aquest medi, que va ser de 16 m/ns. La segona experiència realitzada va consistir a confirmar aquesta velocitat calculada, per a la qual cosa es va preparar un dispositiu al laboratori que emetia ones electromagnètiques i calculava el temps de propagació fins a la seva recepció per una antena.

En el terreny que s'havia d'explorar es van realitzar quatre perfils paral·lels a la base de la Muntanya de Sal, a l'esplanada de davant de la Minilla, onze de perpendiculars al primers, un altre a l'interior de la Minilla i el darrer sobre la sal on es projectava excavar una altra galeria d'accés.

#### ***Equips utilitzats***

L'equip utilitzat en el camp va ser un radar del subsòl SIR 10 de GSSI, en el qual s'han utilitzat tres antenes diferents: una de freqüència central de 100 MHz, una altra de 300 MHz i la tercera de 500 MHz.

Al laboratori, els experiments es van fer amb antenes de 1.000 MHz i de 900 MHz. Per al tractament i anàlisi dels senyals es va utilitzar el software RADAN III de GSSI per a PC.

#### ***Resultats obtinguts***

El perfil 1 es caracteritza per una anomalia superficial i contínua a tota la superfície que arriba fins a poc més de 3 metres de profunditat, corresponent al contacte entre els materials salins del subsòl i les argiles i graves de la cobertora. Molt superficials també, i a una distància de l'origen de 51 m i 54 m., s'observen dues anomalies que corresponen a dos buits del terreny. Una altra anomalia s'observa entre els 22 m i els 32 m del perfil; la part superior se situa als 13,5 metres de profunditat i la part inferior a 15,6 metres de profunditat.

El perfil 2 és paral·lel a l'anterior i més allunyat de la muntanya. La base de la sal és similar al perfil anterior. L'anomalia que s'observava en el perfil anterior entre els 22 m i els 32 m de distància aquí es fa més evident. S'observa que és una gran cavitat situada entre els 12 m i els 19 m de profunditat. També es detecten cavitats superficials a uns 3 metres de profunditat, a distàncies de 0 m, 8 m, 11 m, de 20 m a 35 m i de 50 m a 55 m.

En el perfil 3 es torna a apreciar la reflexió per canvi de material i els vuits superficials situats entre la capa argilosa i la salina. Es torna a detectar, en menor proporció, l'anomalia que s'observava en els perfils anteriors, entre els 22 m i els 32 m de distància.

En general, en els perfils realitzats a l'esplanada de davant de la Minilla es detecta el contacte de les argiles amb la sal, que varia entre una profunditat d'1 m a 6 m. En la base, entre les argiles i la sal, apareixen anomalies que corresponen a buits probablement ocasionats per la dissolució de la sal. Aquestes anomalies acaben al peu del runam Vell i de la Muntanya de Sal. A més profunditat s'ha detectat algun gran buit.

En el perfil realitzat sobre els materials de la Muntanya de Sal s'observen anomalies contínues en els primers metres de profunditat, degudes probablement als plegaments de la sal. No s'observa la presència de cavitat en els 24 primers metres de profunditat analitzats.

En el perfil realitzat a l'interior de la mina existent, també apareixen buits molt a prop de la superfície i algun també a més profunditat. El primer que es detecta és a dos metres de l'inici i amb una profunditat de 3,45 m; altres de similars eren a 15 m i a 20 m de l'inici. I un altre de més important es va detectar a una profunditat d'entre 13,5 m i 17,5 m, situat entre els 20 m i els 25 m de l'inici del perfil.

#### ***Conclusions del georadar al peu de la Muntanya de Sal***

Es detecta la base dels materials detrítics que es recolzen en la sal, que és entre 1 m i 6 m de profunditat. També sobresurten dos tipus de cavitats a l'esplanada i l'interior de la Muntanya de Sal, unes cavitats que se situen a la base dels materials detrítics, segurament per dissolució de la sal, i una altra cavitat molt més important, d'entre 4 i 7 metres d'altura per uns 5 i 10 metres d'amplada, situada a una profunditat que va dels 13,5 m als 17,5 m i amb pendent al NE.



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

#### 3.3.3. Sísmica de reflexió i refracció

##### *Introducció a la prospecció sísmica*

Amb motiu del reconeixement dels primers 40 metres del subsòl en la zona on hi ha col·lapses importants a l'antiga llera del Cardener, a finals del 2003 l'empresa Ercros encarrega una sèrie de prospeccions geofísiques a l'Institut Cartogràfic de Catalunya, en dues fases. Els resultats d'aquestes campanyes de prospecció sísmica es resumeixen a continuació.

##### *Metodologia emprada*

Els mètodes de prospecció sísmica estudien el subsòl a partir de la propagació de les ones sísmiques que es produeixen artificialment al terreny amb la caiguda d'un pes o d'un explosiu. Com en el cas dels terratrèmols, però amb molta menys intensitat, les partícules del subsòl es mouen al pas d'aquestes ones (front d'ones) i les diferents vibracions produïdes s'enregistren i s'estudien perquè, segons com sigui el subsòl, el terreny es va movent d'una determinada manera.

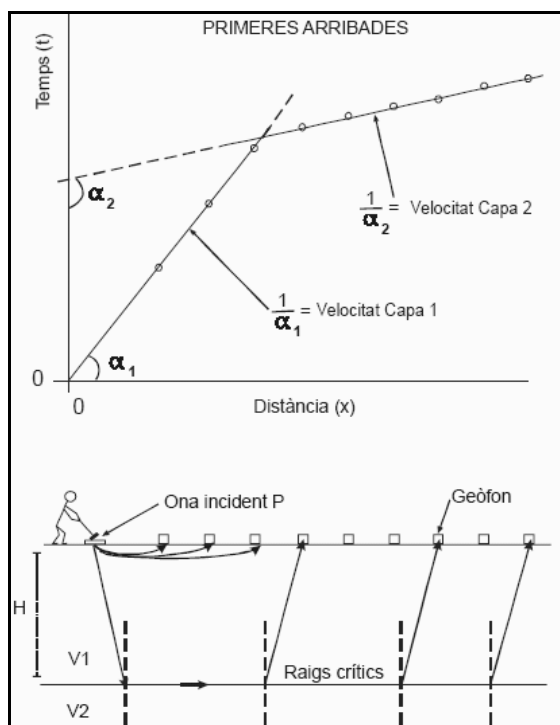
Les ones sísmiques tenen la propietat que viatgen a velocitats diferents segons el tipus de roca que travessen, i quan hi ha canvis litogràfics que refracten i es reflecteixen en aquestes superfícies de contacte canvia també la velocitat. La velocitat de propagació de les ones sísmiques és un bon indicador de les característiques geotècniques dels materials, ja que, com més compacta sigui una roca, amb més velocitat viatgen les ones.

L'estudi d'uns tipus específics d'ones condiciona l'aplicació d'un determinat mètode de prospecció. Així, per exemple, el tractament de les primeres ones es coneix amb el nom de *sísmica de refracció*, ja que les ones refractades són les que arriben més ràpidament a la superfície. Quan s'estudien les ones que es reflecteixen a les capes del subsòl, s'actua en el camp del mètode de reflexió. Cada un d'aquests mètodes proporciona resultats diferents i la seva utilització és determinada pels objectius de cada estudi en particular.

##### *Sísmica de refracció*

La sísmica de refracció es basa en els raigs sísmics refractats críticament. La lectura dels temps de les primeres arribades i l'espaiament entre els geòfons proporcionen les dades necessàries per aplicar les equacions de les trajectòries dels raigs refractats i calcular les velocitats de propagació i els gruixos de cada capa existent sota el dispositiu experimental.

El mètode de refracció proporciona com a resultats els perfils sísmics de refracció, que mostren com es distribueixen les velocitats d'un tall del subsòl (camp de velocitats  $V(x,z)$ ). A partir d'aquestes imatges sísmiques, es dedueixen les capes del sòl i les propietats mecàniques dels materials subjacents (vegeu la figura núm. 70).

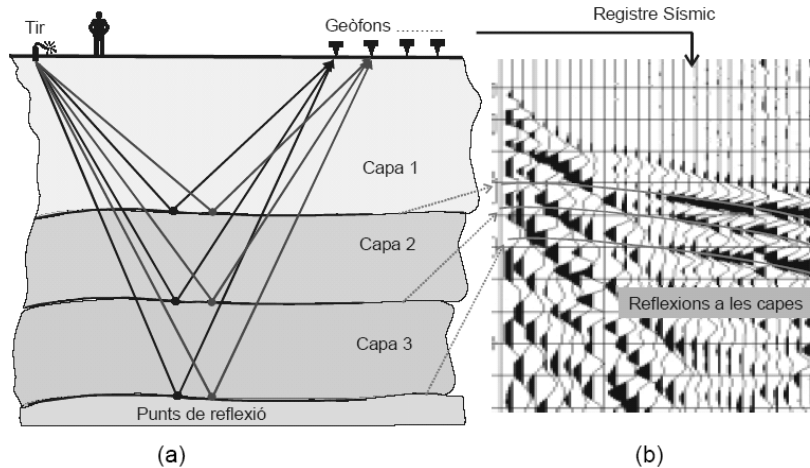


**Figura núm. 70. Esquema d'interpretació del mètode de sísmica de refracció. Els temps crítics defineixen rectes (x, t); cada una representa una capa que té una velocitat igual a l'invers de la tangent, i el seu punt de tall amb l'eix del temps proporciona la fondària (ICC desembre 2003)**

### 3.3.3. Prospecció sísmica

#### *Sísmica de reflexió*

Aquest mètode de prospecció geofísica es va desenvolupar per a la localització dels reservoris de petroli i cap als anys setanta va començar a aplicar-se al reconeixement d'estructures geològiques més superficials. Consisteix a enregistrar sobre la superfície del terreny el front d'ones produït per una explosió controlada (tir). D'entre les diferents trajectòries que es produeixen només es consideren les degudes a les reflexions de les capes presents al subsòl (vegeu la figura núm. 71).



**Figura núm. 71. a) Esquema del recorregut dels raigs reflectits a tres capes per una posició de tir i dues estacions receptores (geòfons). b) A causa de l'equació de propagació, les reflexions queden marcades al registre sísmic com a trajectòries hiperbòliques (ICC desembre 2003)**

Per tenir una bona inspecció de la zona d'estudi, cal augmentar el nombre de geòfons i de tirs en comparació amb un perfil de refracció de longitud equivalent. El resultat és un grup de traces sísmiques procedents de tots els tirs enregistrats que s'analitzen, es processen i després es reordenen en conjunts de punts reflectors comuns (CDP), els quals contenen la informació de totes les reflexions trobades al terreny. Un cop totes les traces d'un mateix CDP s'han agrupat, se sumen i s'obté una traça CDP. El conjunt de totes les traces CDP constitueix l'anomenada *secció sísmica de reflexió*, que és el resultat final d'aquest mètode. Una secció sísmica és una imatge del subsòl on les reflexions es veuen en forma de lòbuls negres de major amplitud i defineixen les capes reflectores que després s'associaran a les estructures geològiques.

El tractament de les dades en sísmica de reflexió és més laboriós i delicat que el processament de refracció; un dels reptes més importants és aconseguir aïllar dels registres les reflexions i eliminar les altres ones (ona directa, refraccions, soroll, etc.). Aquesta tasca comporta l'aplicació de tractaments multisenyal (filtres, desconvolucions, etc.), que, si no es va amb compte, poden crear artefactes i confondre's amb falsos reflectors. Un altre punt conflictiu del processament és que en les seccions sísmiques de reflexió les capes reflectores estan en mode temps doble perquè cada raig reflectit ha fet el viatge d'anada (incidència) i de tornada (rebot). Als geòlegs que estan acostumats a treballar amb seccions sísmiques els és fàcil passar mentalment del temps doble on es detecta un reflector a la fondària que li tocava, però en molts casos es facilita aquesta tasca automàticament i es presenten les seccions sísmiques de reflexió convertides a una fondària aproximada. Les seccions sísmiques de reflexió contenen una informació aproximada de les velocitats dels materials, però el seu objectiu fonamental és que descriuen la disposició geomètrica del subsòl estudiat.

En aquest treball s'ha aplicat el mètode de reflexió per caracteritzar la geologia de la zona, ja que s'aconsegueix una major fondària d'investigació. Però com que el dispositiu experimental que s'utilitza per a aquesta tècnica és molt redundat en tirs, s'han aprofitat les mateixes dades extraient dels registres sísmics les ones refractades i així obtenir una informació addicional del subsòl (mètode de refracció).

#### *Equips utilitzats, treball de camp i situació dels perfils geofísics*

Les dades de camp s'han obtingut amb els equips de què disposa el Grup de Prospeccions de l'ICC per a aquest tipus de treball.

- Sismògraf: Bison 8048 de 48 canals. *Digital instantaneous floating point* (DIFP).
- 3 cables sísmics de 115 metres de longitud, amb 24 connexions espaiades 5 metres (Mark, Inc.).
- 72 geòfons de 40 Hz de freqüència natural (Mark, Inc.).

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

- Font d'energia sísmica: mall de 8 kg de massa impactant sobre placa metàl·lica.
- Equip addicional: ordinador portàtil (PC) per a la gestió de les dades de camp, cintes mètriques per posicionar els perfils, etc.
- Software: el processament de les dades sísmiques s'ha realitzat amb dues aplicacions: per al tractament de refracció s'ha utilitzat el programa Rayfract (V.34; octubre del 2002) i per al tractament de reflexió el paquet de programes Promax (V.7, LandMarc), també molt estès en sísmica de reflexió petroliera.

Els treballs de camp han transcorregut durant la segona quinzena de setembre d'enguany, pel que fa a la primera fases, i durant el desembre del mateix any pel que fa a la segona fase.

Els paràmetres d'adquisició van ser:

Distància entre geòfons.....	48 geòfons distribuïts cada 2 m
Tirs realitzats.....	Es va disparar a 14 metres i a un metre del primer geòfon i, consecutivament, a cada 2 metres fins a arribar a un metre després de l'últim geòfon. L'últim tir també es va situar a 114 metres de l'últim geòfon de cada línia.
Font d'energia.....	Mall de 8 kg de massa amb 5-6 stacks per tir.
Longitud del registre.....	500 ms
Interval de mostreig.....	0,125 ms
Filtres passabanda.....	8-500 Hz

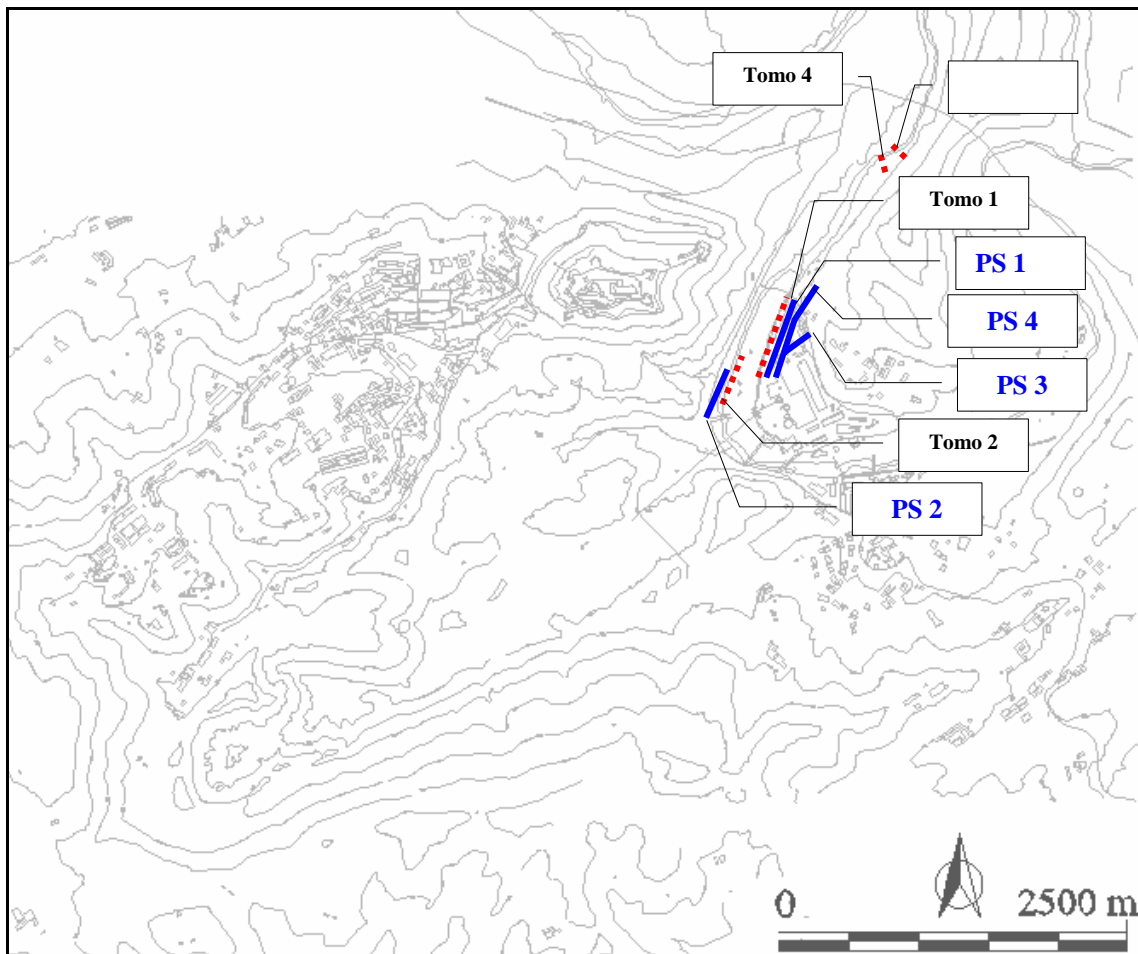


Figura núm. 72. Emplaçament dels perfils sísmics (en traç continu) en relació amb els altres perfils geoelectrics (traç de punts) (a partir d'ICC 2003)

### 3.3.3. Prospecció sísmica

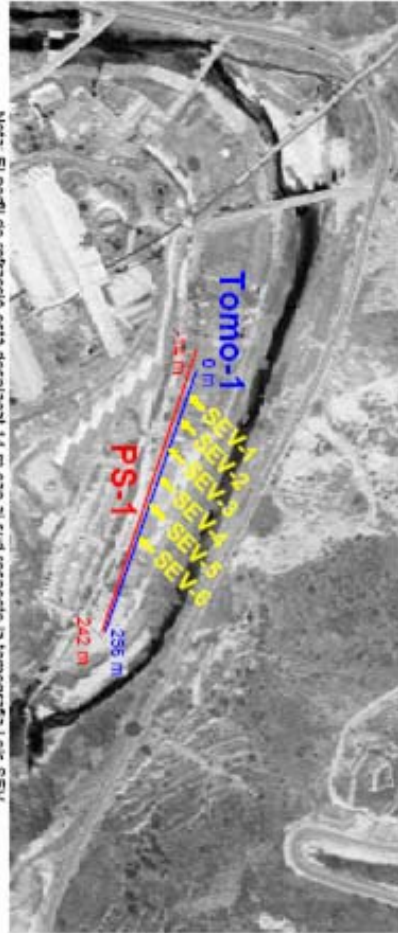
#### *Resultats obtinguts*

##### SECTOR SUD. MARGE ESQUERRE DEL RIU CARDENER

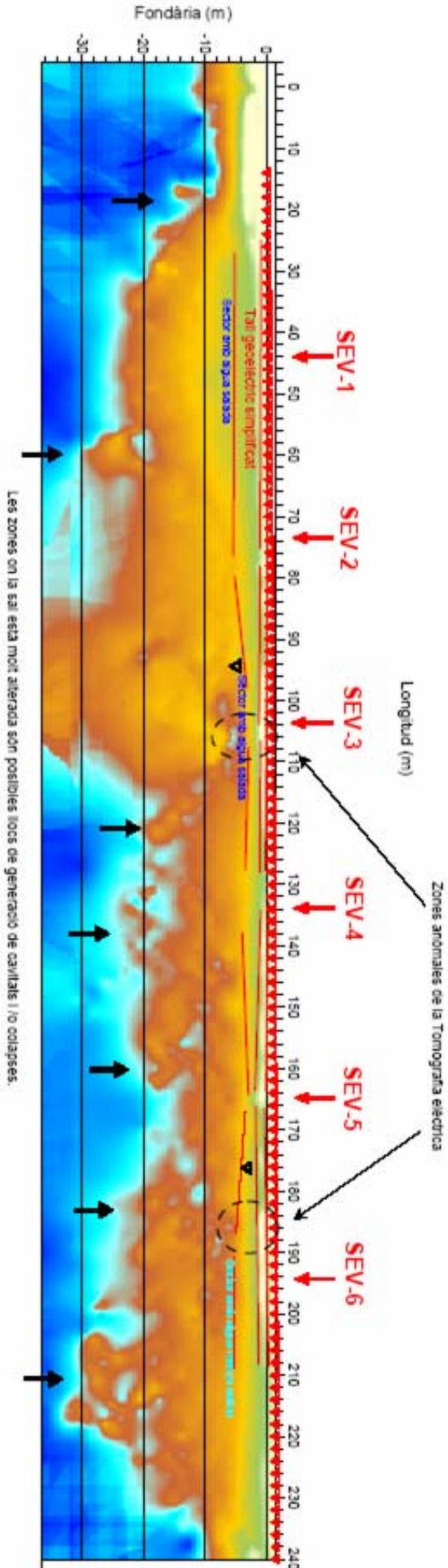
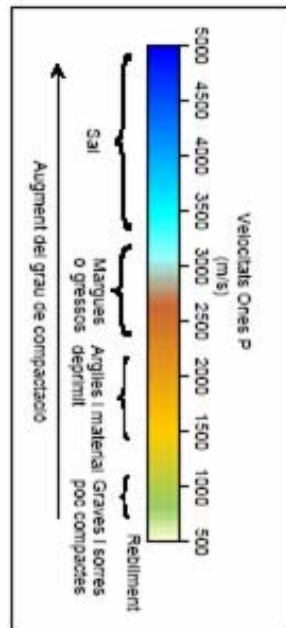
El perfil de refracció PS-1 (vegeu figura núm. 73) mostra molt bona correspondència entre les anomalies anteriors i uns sectors amb presència de sal. La sal, quan és competent, es caracteritza per velocitats elevades, les quals van disminuint de valor en proporció al grau d'alteració/dissolució. Segons això, els sectors elèctrics anòmals es corresponen amb els trams més superficials del perfil de refracció que poden contenir sal. El fet que per sota d'aquests sectors superficials es detectin baixes velocitats és un indicatiu que hi pot haver cavitats. Passa el mateix en altres zones del perfil i és preferible dirigir-se a la làmina corresponent per poder apreciar-ho amb tot detall. Un altre fet apreciable de l'anàlisi de refracció és que el contacte entre els gresos i la sal no es realitza de forma neta, sinó que el camp de velocitats mostra tota una franja on la transició es realitza de manera heterogènia. Entre els 75 metres i els 112 metres lineals s'aprecia un sector on els materials presenten poca compactació.

Pel que fa a la reflexió del perfil PS-1 (vegeu figura núm. 74), aquesta mostra una fondària d'investigació fins aproximadament als 45 m. En aquest cas, el caràcter més reflectiu s'ha associat als trams de gresos (i probablement margues en segon grau), mentre que els nivells profunds amb poques reflexions es correspondrien amb la sal (que quan és competent és sísmicament transparent). A la part més superficial s'aprecien llocs amb poques reflexions, la qual cosa pot relacionar-se amb la presència de materials molt poc compactes. En el tram dels reflectors potents es distingeixen zones d'importantes ruptures que indiquen forts plegaments i col·lapses.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



Nota: El perfil de refracció està desplaçat 14 m cap al sud respecte la tomografia i els SEV



Les zones on la sal està molt alterada són possibles focs de generació de cavitats i/o col·lapses.

Figura núm. 73. Refracció. Resultats i interpretació del perfil de refracció PS-1 (ICC desembre 2003)



### 3.3.3. Prospecció sísmica

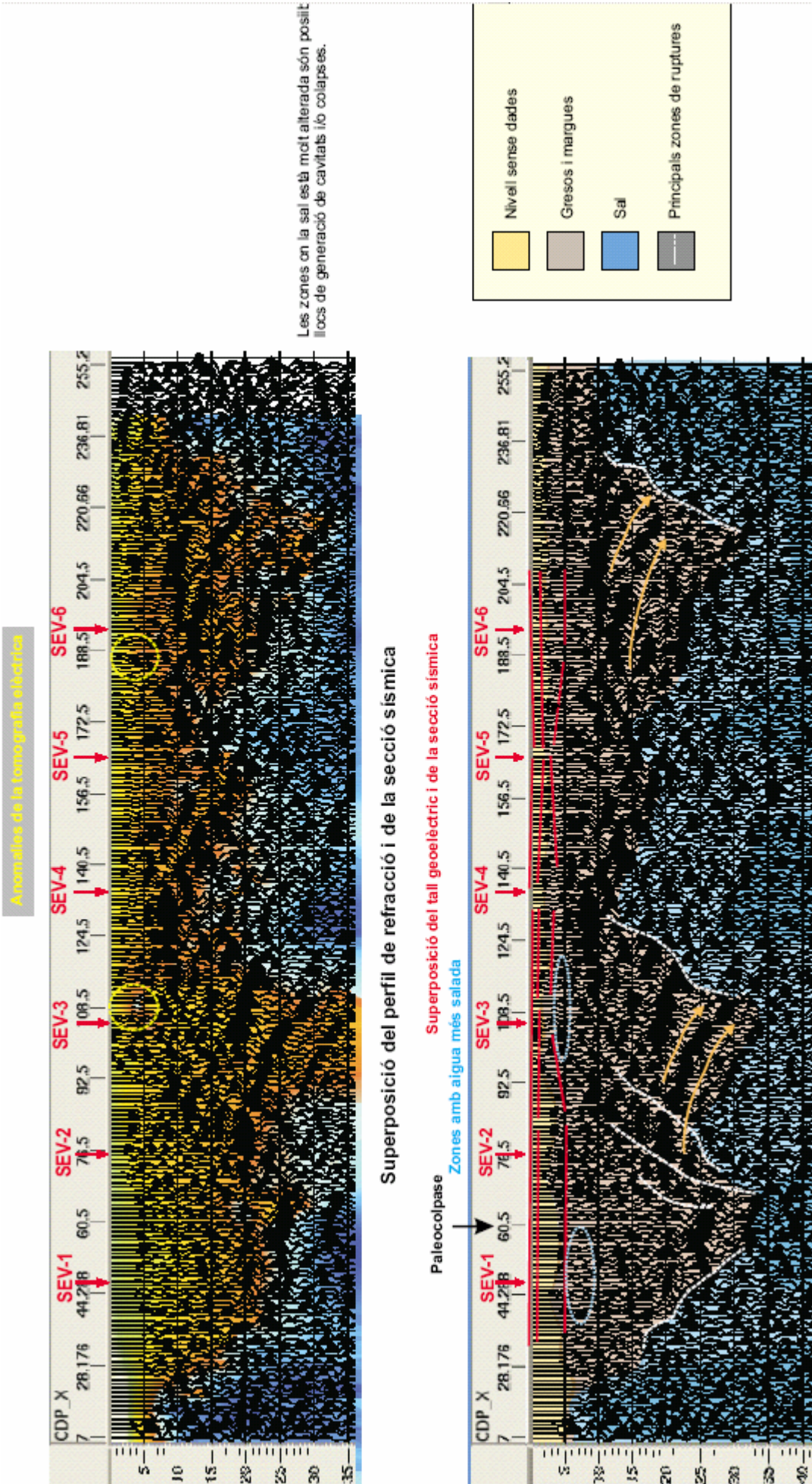


Figura núm. 74. Reflexió. Resultats i interpretació del perfil PS-1 (ICC desembre 2003)

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

SECTOR SUD. MARGE DRET DEL RIU CARDENER (làmines 2 i de la 8 a la 10)

El perfil de refracció PS-2 (vegeu figura núm. 75) també mostra una molt bona correspondència amb l'anomalia anterior, la qual, pels valors de velocitats trobats, se situaria una mica més al fons de l'anomalia. A banda i banda de l'anomalia es defineixen les direccions preferents de flux i justament coincideixen amb dues zones deprimides on la sal probablement està força dissolta. Cap a l'extrem inicial del perfil s'aprecia força bé la zona de contacte litològic que aflora en superfície. En aquest sector també s'aprecien llocs de probable col·lapse on la sal podria estar descomposta.

La reflexió del perfil PS-2 (vegeu figura núm. 76) mostra també una fondària d'investigació fins als 45 m. En aquest cas, el caràcter més reflectiu s'ha associat als primers nivells de sal, on aquesta es troba fortament plegada, però a la vegada compactada. Per la seva banda, els nivells profunds amb poques reflexions es correspondrien amb sal dura, probablement menys dúctil (possible canvi de composició). A la part superficial la potència de gresos i margues seria escassa.

### 3.3.3. Prospecció sísmica

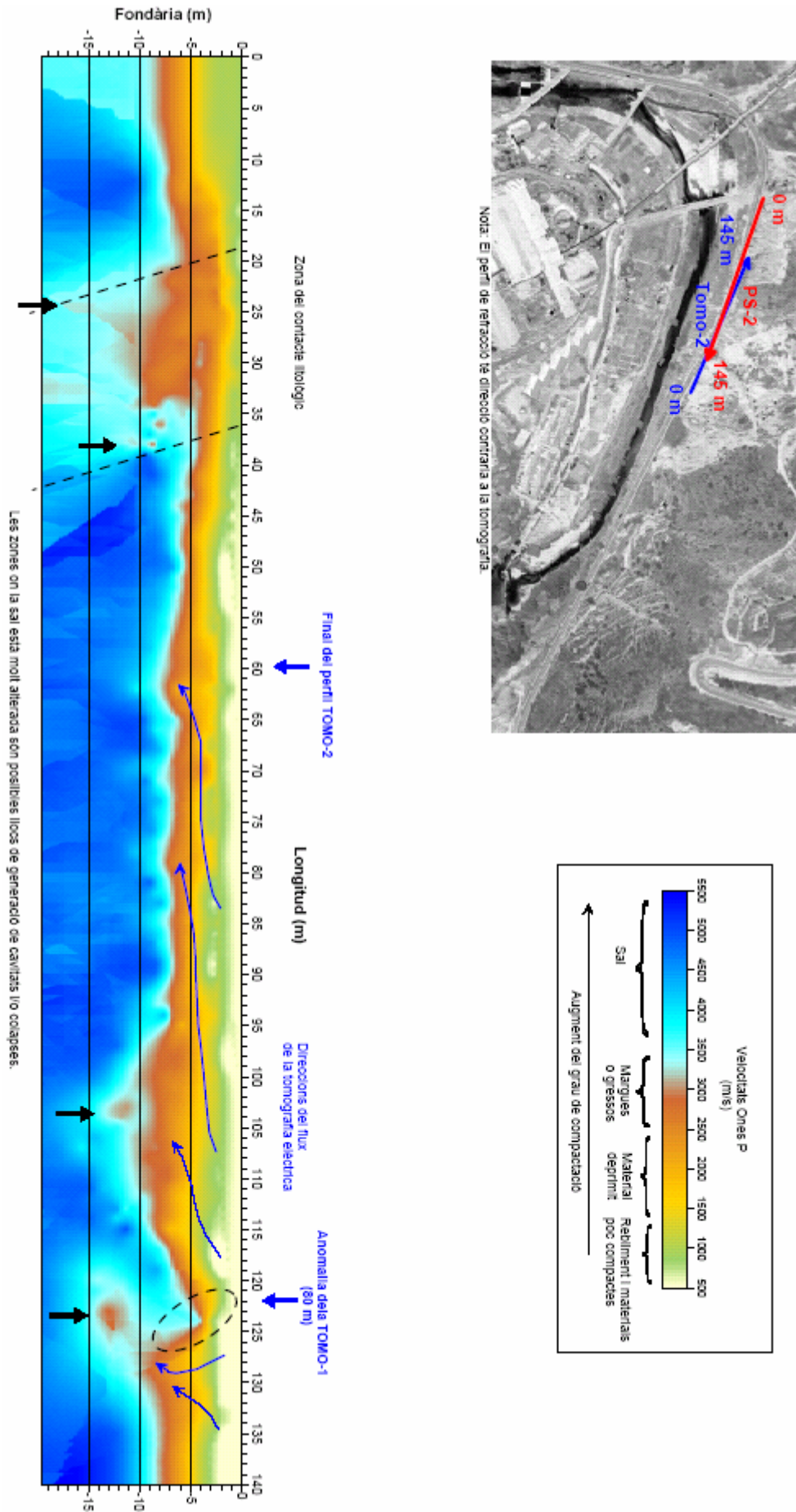
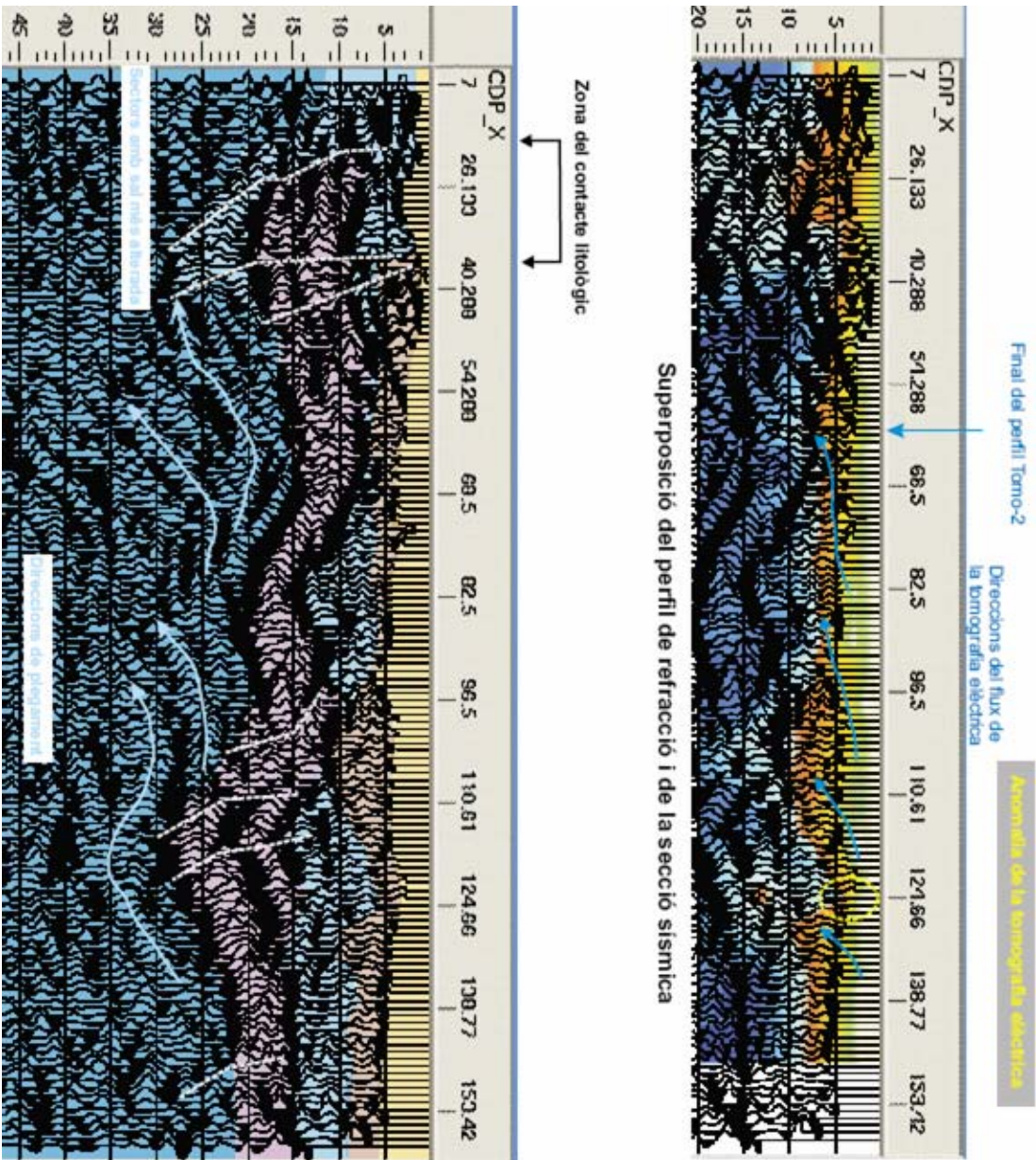


Figura núm. 75. Refracció. Resultat i interpretació del perfil de refracció PS-2 (ICC desembre 2003)



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



Les zones on la sal està molt alterada són possibles llocs de generació de cavitats i/o colapses.

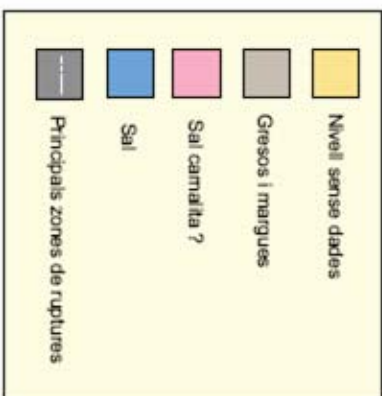


Figura núm. 76. Reflexió. Resultats i interpretació del perfil PS-2 (ICC desembre 2003)

### 3.3.3. Prospecció sísmica

#### MARGE ESQUERRE DEL RIU CARDENER

El perfil de refracció PS-3 (vegeu figura núm. 77) és de 70 metres de longitud i es va realitzar en la direcció NE, creuant la plaça infantil de la colònia Manuela i arribant fins al marge de la carretera.

En l'extrem SO s'ha localitzat el sostre de la sal entre els 12-15 metres de fondària fins als 17-20 metres de longitud del perfil. A partir d'aquesta distància, s'observa que el sostre de la sal cabussa amb un pendent aproximat de 35°, fins a arribar als 60 metres lineals, on desapareix. La morfologia d'aquest contacte presenta algunes irregularitats importants que es podrien interpretar com a sectors de possible dilució. Així mateix, seguint el mateix cabussament però a menys fondària, es detecta un tram de velocitats altes que podrien correspondre's a un paquet salí. Les baixes velocitats (l'aigua té una velocitat sísmica de 1.500 m/s) detectades pels materials que separen aquest paquet de sostre de la sal poden ser un indicatiu de la presència de carstificacions.

En superfície s'observa que a l'entorn dels 30 metres lineals hi havia evidències d'un cert esfondrament diferencial. Segons els resultats obtinguts, aquesta zona es correspondria en fondària amb l'inici del paquet abans esmentat.

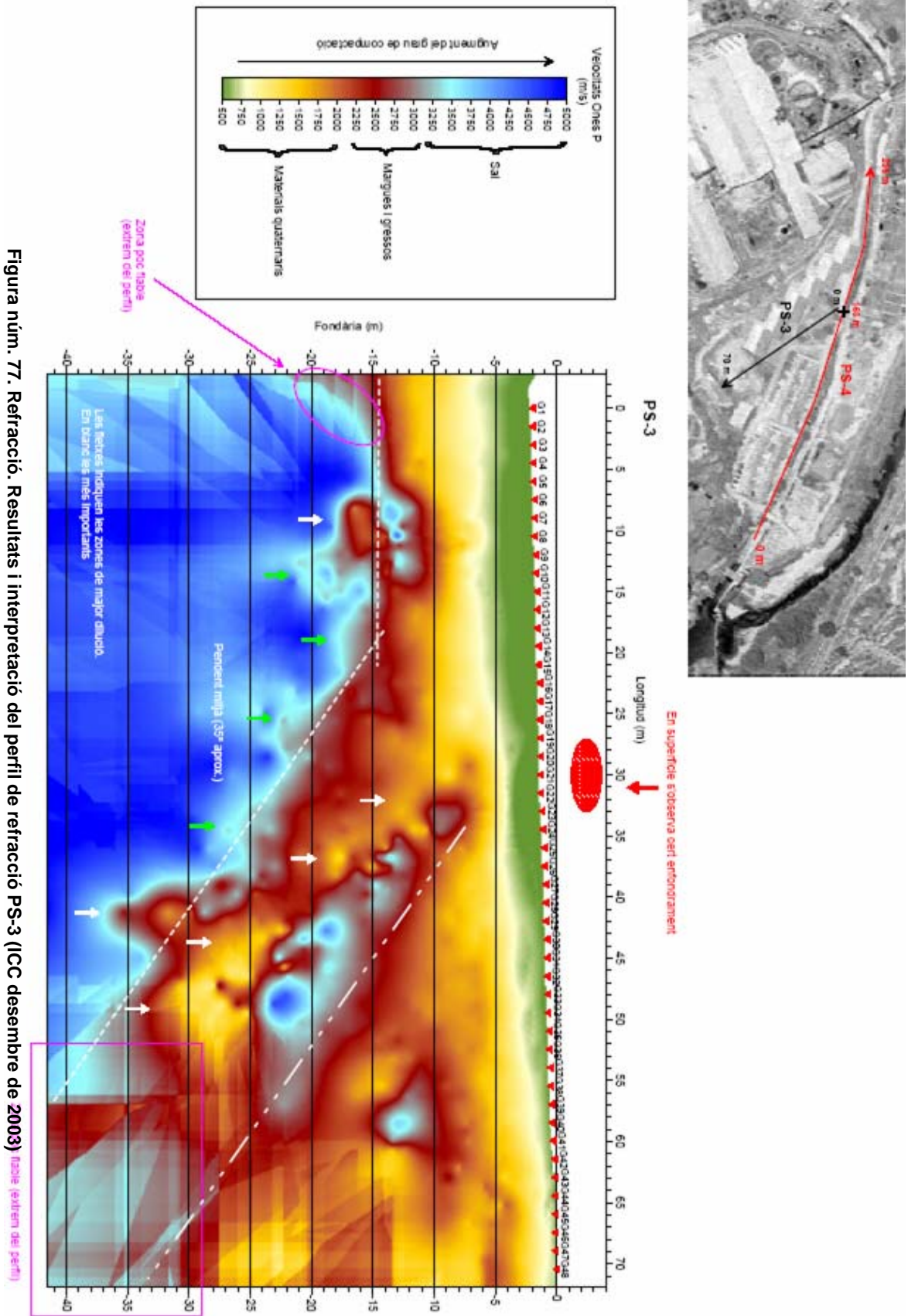
Els materials per sobre de la sal es caracteritzen per una prima capa poc compacta que va disminuint de gruix cap a la carretera, que es podria associar a un Quaternari llimós-argilós. A l'extrem sud i fins als 25 metres de longitud podria haver-hi un paquet de graves per sota d'aquesta capa; després de l'esglaó i en direcció a la carretera aquesta capa tendeix a desaparèixer. Probablement, la resta del material, definit per velocitats compreses entre 2.000 m/s i 3.000 m/s, es correspon amb trams de gresos alternat amb argil·lites.

El perfil de refracció PS-4 (vegeu figura núm. 78) té 240 metres de longitud i es va realitzar en direcció N-S, gairebé paral·lel al perfil PS-1 (primera fase), però en sentit invers.

Abans de descriure'l, cal esmentar el fet que la distància entre geòfons ha estat de 5 metres i s'han disparat tirs cada 20 metres. Això comporta menys punts de lectura per metre lineal que els altres perfils, i per tant, menys resolució espacial. Es calcula com a límit aproximat de resolució lateral la meitat de la distància entre geòfons; en aquest cas 2,5 metres.

En aquest perfil de refracció s'observa una morfologia més o menys horitzontal del sostre de la sal que ascendeix lleugerament cap a l'extrem nord. A trets generals, el contacte de la sal amb els gresos es produeix també de manera irregular, cosa que explica l'elevat grau de plegament de la sal i de les possibles zones de dissolució, les quals també es caracteritzen per velocitats baixes circumdants a les zones de sal. Aquest fenomen s'observa amb més grau a partir dels 130 metres i cap al sud, però amb molta menys intensitat que al perfil anterior (PS-3). Respecte als materials quaternaris, s'observa que també van augmentant de gruix cap a l'extrem sud.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS





### 3.3.3. Prospecció sísmica

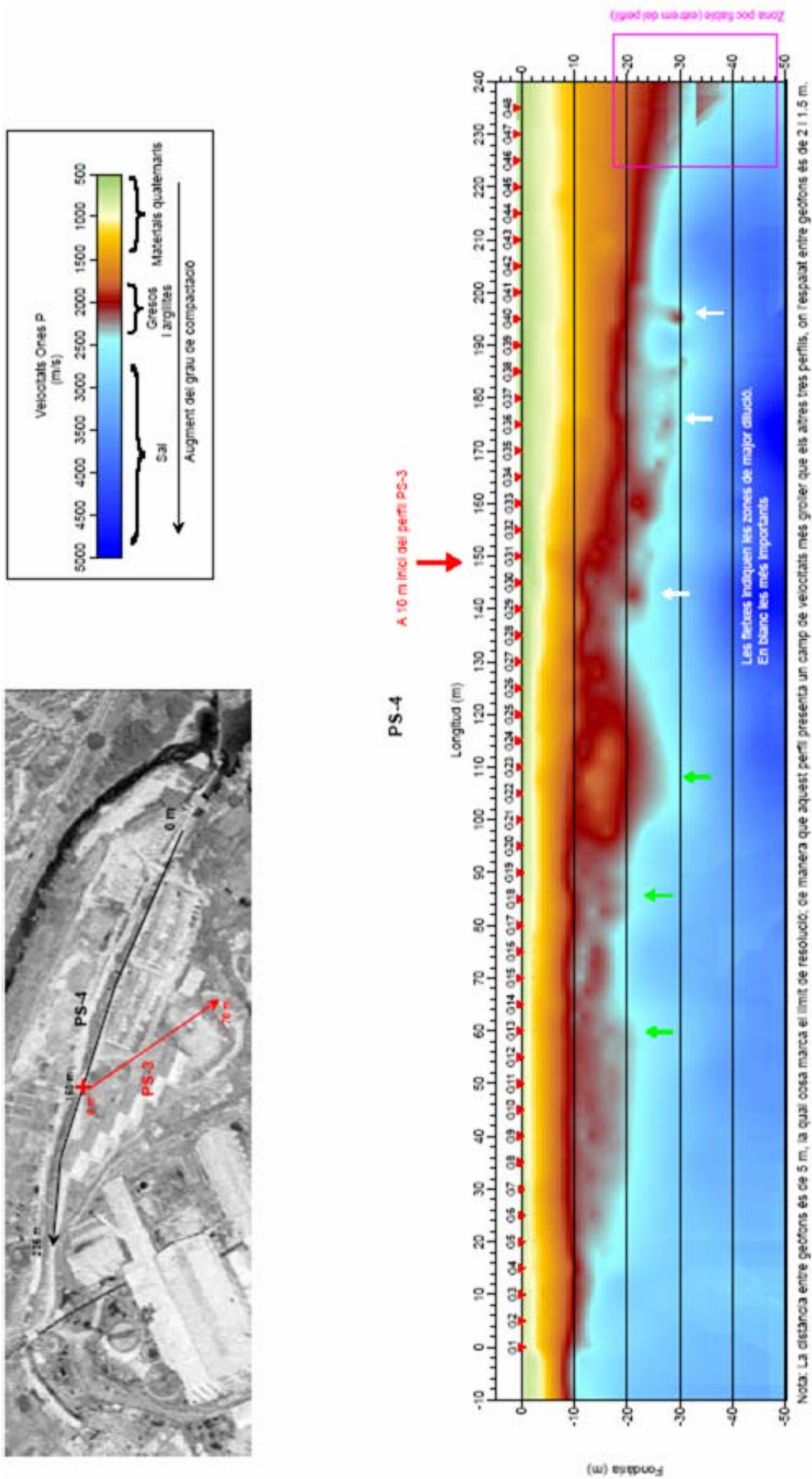


Figura núm. 78. Refracció. Resultats i interpretació del perfil PS-4 (ICC desembre 2003)

### 3. RESULTATS HIDROGEOOLÒGICS

#### *Conclusions de la sísmica*

La geofísica sísmica realitzada en la primera fase en els dos sectors –la fàbrica tèxtil i la zona de la fàbrica Ercros del riu Cardener– ha consistit a aplicar el mètode de refracció i el mètode de reflexió. Els resultats recopilatoris es poden veure a la figura núm. 79. Les conclusions són:

- Amb el mètode de refracció s'ha aconseguit definir els primers 15-25 metres de fondària i ha estat possible discriminar entre materials quaternaris i deprimits (baixes velocitats), gresos i margues (velocitats mitjanes) i sal competent (velocitats altes). Segons això, s'ha pogut realitzar una correlació entre anomalies elèctriques i discriminar les possibles zones potencials de cavitats (baixes velocitats entre els contactes sal - materials terciaris).
- El mètode de reflexió ha proporcionat la disposició geomètrica dels materials fins a una fondària a l'entorn dels 45 metres i s'ha caracteritzat bé el contacte entre la sal i els gresos i les zones de tensió dels materials. En la conversió a fondària de les seccions sísmiques s'estima un error de l'entorn dels 3 m a partir dels 15 m, que pot anar augmentant en anar aprofundint.

La segona fase d'estudi representa un complement de la geofísica realitzada en la primera fase. Els seus resultats són:

- ◆ Els dos perfils sísmics de refracció han posat en evidència les zones preferents de dilució de les sals, les quals s'han detectat de manera més important sota el perfil PS-3. En aquest perfil també s'ha pogut establir un cabussament del sostre de la sal a l'entorn dels 35 ° que comença a iniciar-se de forma neta cap als 15-25 metres lineals.
- ◆ A la figura núm. 79 es representen els quatre perfils sísmics de refracció realitzats durant les dues fases de l'estudi. Així, es mostren els perfils situats segons les respectives posicions relatives.

### 3.3.3. Prospecció sísmica

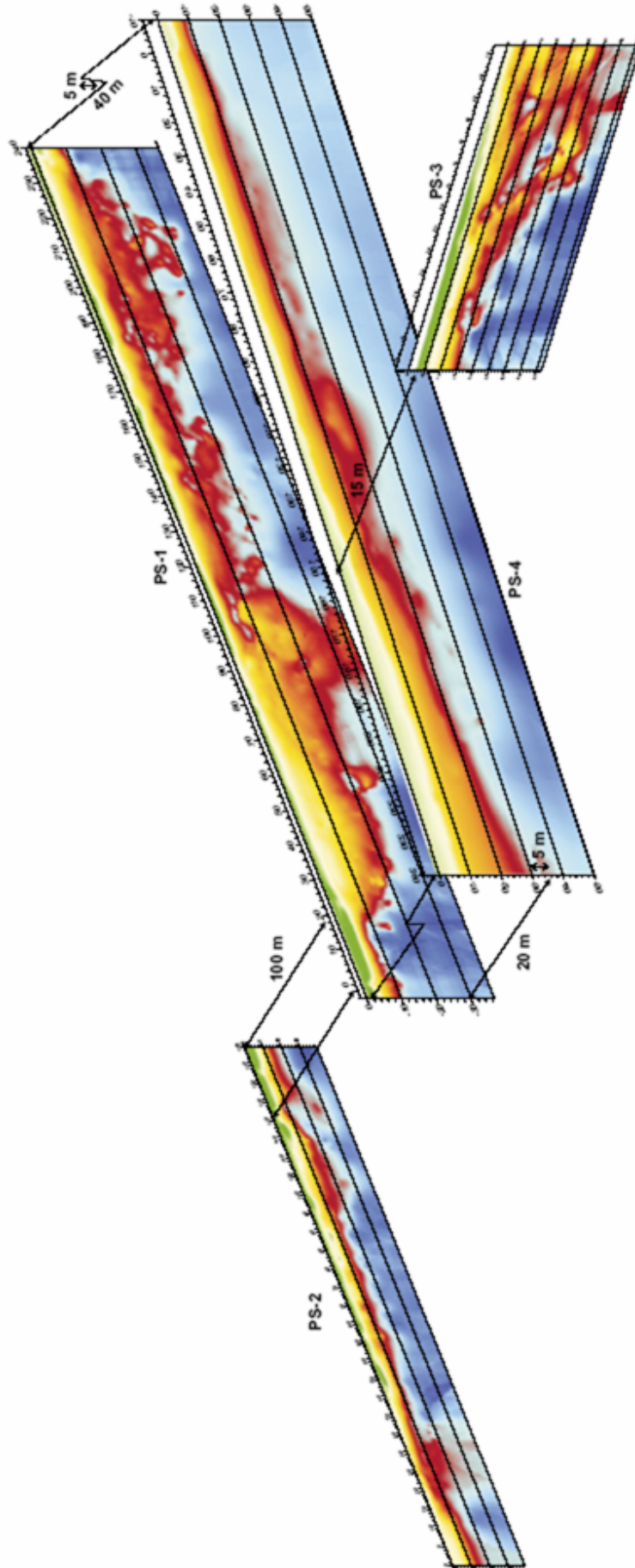


Figura núm. 79. Composició relativa dels quatre perfils sísmics de refracció (ICC desembre 2003)

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

#### 3.3.4. Prospecció electromagnètica

##### *Introducció a la prospecció electromagnètica*

A mitjan 1999, i amb la finalitat de detectar la presència de cavitats al subsòl al voltant del canal de l'Aranyó i de la vall Salada, la Junta d'Aigües de Catalunya va encarregar al Grup de Prospecció Geofísica del Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica de la Universitat de Barcelona dos treballs de geofísica mitjançant cales electromagnètiques, que es resumeixen a continuació.

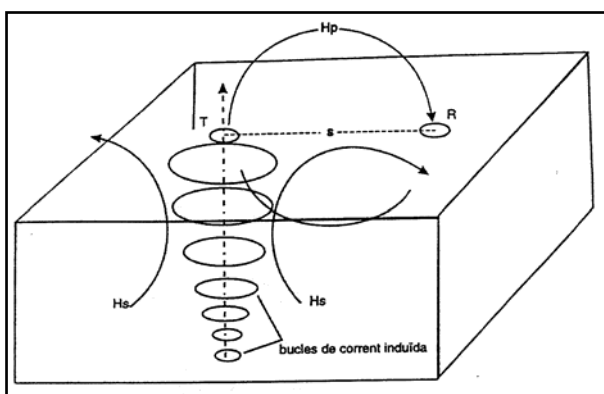
##### *Metodologia emprada*

La prospecció electromagnètica proporciona informació de la resposta del terreny a la propagació dels camps electromagnètics, els quals es componen d'un camp elèctric i un camp magnètic perpendiculars entre si. Aquesta resposta del terreny es coneix com a *conductivitat aparent* i pot definir-se com la facilitat amb què un corrent pot travessar un determinat material. Aquesta conductivitat només és igual a la real si el terreny és homogeni. La conductivitat elèctrica aparent és la inversa de la resistivitat i en el sistema internacional la unitat de mesura és mho/m. Si la conductivitat de les roques és baixa s'utilitza un submúltiple, generalment el mil·lisiemens/m (mS/m).

La magnitud del camp secundari és directament proporcional a la conductivitat del terreny. Aquesta relació és certa només si l'espai entre les dues bobines és molt menor a la profunditat a la qual l'ona electromagnètica s'atenua, un 0,3679 de la seva amplitud original. A la pràctica això significa que la conductivitat del terreny és menor que 100 mil·lisiemens/metre.

La conductivitat elèctrica de les roques depèn de la composició mineral dels grans que constitueixen la matriu, del contingut en aigua i de la concentració en electròlits que aquesta conté.

En circular un corrent altern a través d'una bobina amb diverses voltes de cable, es generen camps electromagnètics secundaris. El camp electromagnètic primari viatja des de la bobina transmissora fins a la receptora, tant a sobre com a sota de la superfície. Quan sota les bobines el terreny és homogeni, pràcticament no hi ha diferències entre els camps electromagnètics propagats per la superfície i els que es transmeten a través del terreny, només una petita disminució de l'amplitud del segon respecte al primer. Però en presència d'un cos conductor, el component magnètic del camp electromagnètic que ha penetrat en el terreny induïx corrents alterns o paràsits que flueixen per l'interior del conductor. Els corrents paràsits generen el seu propi camp electromagnètic secundari, el qual viatja al receptor. En aquest moment el receptor rep el resultat dels camps primari i secundari, que han variat en amplitud i en fase respecte al camp primari. Aquesta diferència entre els camps electromagnètics del receptor i del transmissor mostra la presència d'un conductor i dona informació sobre la seva geometria i sobre les seves propietats magnètiques (vegeu la figura núm. 80).



T = bobina transmissora  
R = bobina receptora  
Conductivitat del terreny =  $\sigma$

$$\sigma = 4 / 2 \pi f \mu S^2 (H_s H_p)$$

On:  
 $f$  = freqüència de treball  
 $\mu$  = permeabilitat de l'espai buit  
s = espaiament entre bobines  
 $H_s$  = camp magnètic secundari  
 $H_p$  = camp magnètic primari

**Figura núm. 80. Transmissió de les ones electromagnètiques en el terreny (Grup de Prospecció Geofísica de la UB agost 1999)**

Un dels avantatges d'aquest mètode té com a origen el fet que la inducció de fluxos de corrents és resultat del component magnètic del camp electromagnètic i, per tant, no hi ha necessitat de contacte físic del transmissor o del receptor amb el terreny. Com a conseqüència d'això, les prospeccions electromagnètiques són molt més ràpides que altres en què el camp magnètic no és induït, sinó que s'han de clavar els electrodos en el terreny a cada mesura. A més, no es plantegen problemes en terrenys rocallosos, com succeeix amb la prospecció elèctrica.

### 3.3.4. Prospecció electromagnètica

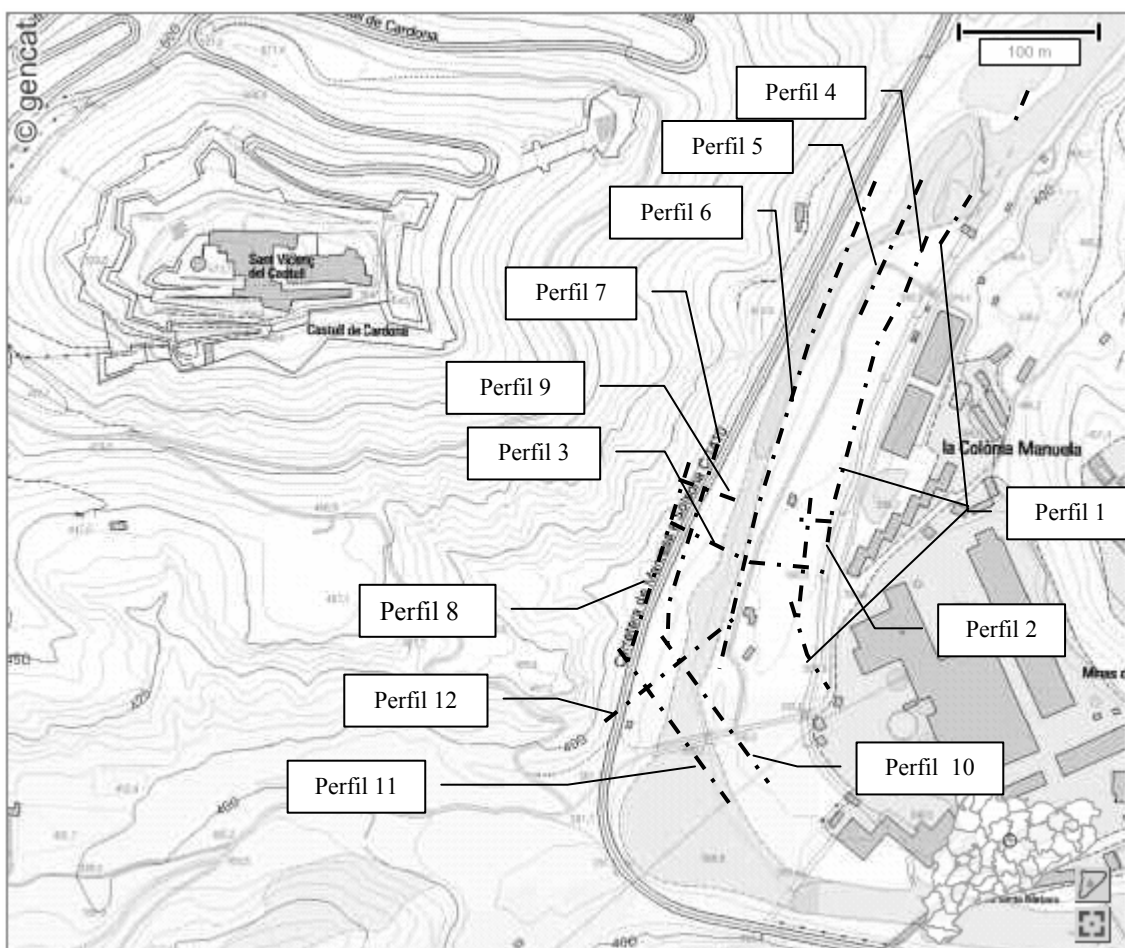
#### Material

La campanya de prospecció electromagnètica es va realitzar en dues fases:

- Primera fase. Es va dur a terme el juliol del 1999, quan es va utilitzar l'instrument de prospecció electromagnètica Geonics model EM-31, que mesura la conductivitat aparent del terreny a una fondària efectiva de 3 a 6 m.
- Segona fase. Es va dur a terme l'agost del 1999, quan es va utilitzar el conductímetre model EM-34, amb què l'aprofundiment pot ser de 7,5 m, 15 m, 30 m i 60 m.

#### Treballs realitzats

En la primera fase, la del juliol del 1999, es van realitzar dotze perfils amb l'equip EM-31, amb dues profunditats d'investigació, a 3 m i a 6 m sota el terreny. La zona correspon a la llera del riu en el tram que va des de la colònia Manuela fins al pont vell de la Coromina. En total, 1.709 metres i amb intervals de 0,5 metres. Com que es van realitzar dues mesures per punt, es van poder fer dos mapes de conductivitat elèctrica aparent, per a 3 m i 6 m de profunditat (vegeu la figura núm. 81).

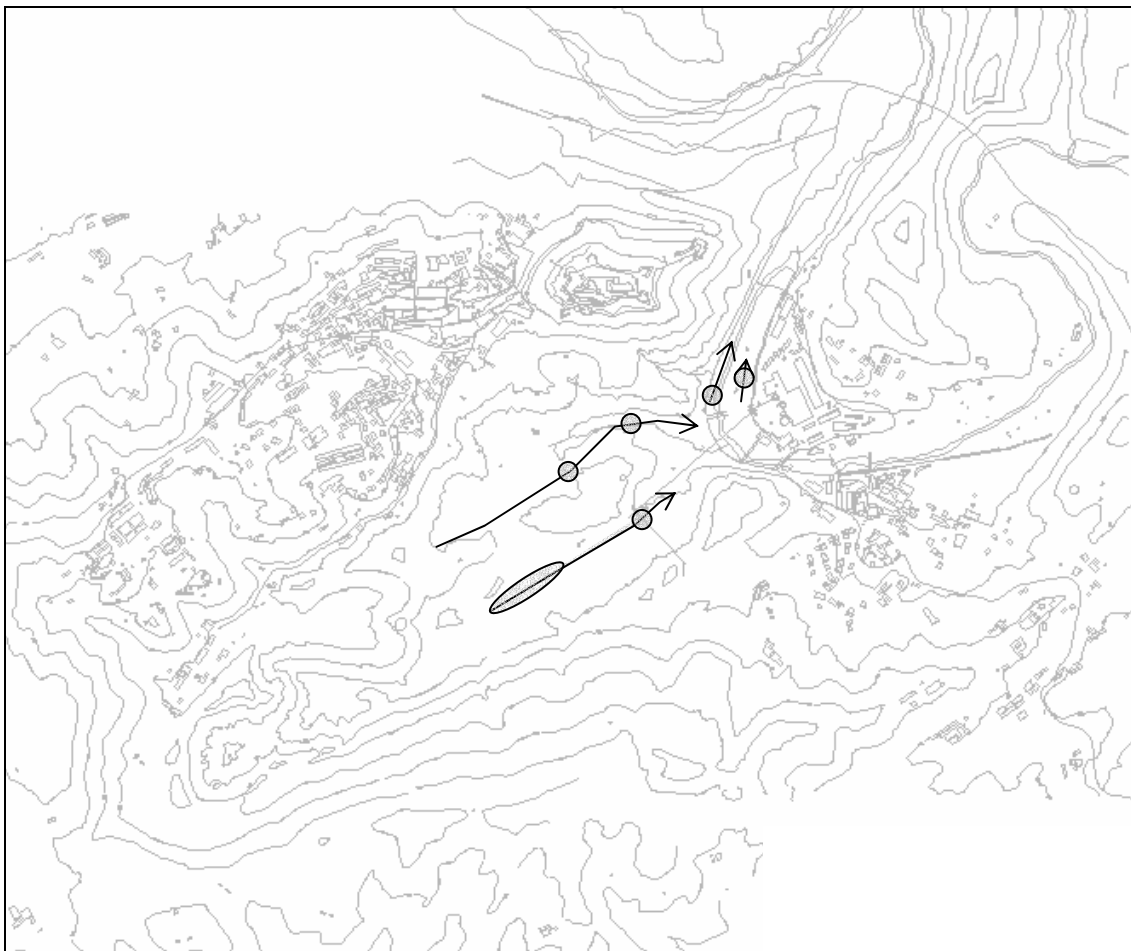


**Figura núm. 81. Mapa de situació dels perfils de cales electromagnètiques EM-31 a profunditats somes (3 i 6 m) (a partir d'UB juliol 1999)**



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

En la segona fase de prospecció electromagnètica, la de l'agost del 1999, es van prospectar tres zones i es van fer quatre perfils amb l'EM-34 (vegeu la figura núm. 82):



**Figura núm. 82. Mapa de situació dels perfils de cales electromagnètiques EM-34 a profunditats profundes (>7,5 m) (a partir d'UB juliol 1999)**

- Davant de la factoria de la mina, des del pont que la comunica amb la carretera C-1410, s'han fet dos perfils, paral·lelament al riu i entre si, un de 150 m i un altre de 110 m, a uns 30 m l'un de l'altre. El primer perfil s'ha fet cada 5 m els primers 100 metres, i després s'ha fet cada 10 m. En total s'han realitzat 26 mesures. El segon perfil s'ha fet tot cada 10 m, en total 12 mesures. En aquesta zona la presència de bòfies o dolines és alta, apareixen en superfície amb grans diàmetres i profunditats. En aquest perfil s'han desestimat els valors de conductivitat realitzats a 60 metres de profunditat, ja que les línies elèctriques presents a la zona els han distorsionat.
- Des de 16 metres de la barrera que trenca la pista del ramal nord de la vall Salada fins a 52 metres de la carretera C-1410 s'han fet 18 mesures cada 40 m, amb un total de 680 metres prospectats. Les mesures s'han fet sobre la pista de terra que arriba fins a la part alta de la vall. A la part baixa de la vall es veu una zona recoberta recentment amb materials obscurs; probablement s'hi han format també dolines. En aquest perfil s'han utilitzat les mesures realitzades a 7,5, 15, 30 i 60 metres de profunditat.
- Pujant pel ramal sud de la vall Salada des de 20 metres després del creuament de les cintes transportadores, s'han fet 14 mesures cada 40 m, amb un total de 520 metres prospectats. Les mesures s'han fet sobre la pista que arriba fins al diàpir salí, però en aquesta zona no s'han pogut fer mesures ja que hi ha una tanca metàl·lica que distorsionava el camp electromagnètic generat per l'aparell. Tampoc no se n'han pogut fer a la part més baixa de la vall, a causa de la presència de la cinta transportadora amb estructura metàl·lica. La pista, feta al damunt de materials de rebliment, presenta una gran quantitat de solcs deguts a la dissolució. En aquest perfil s'han utilitzat les mesures realitzades a 7,5 m, 15 m, 30 m i 60 m de profunditat i s'han invertit perquè totes tinguin el mateix sentit.

### 3.3.4. Prospecció electromagnètica

En els perfils realitzats, el sostre correspon a 7,5 metres de profunditat, i no a la superfície del terreny. Això s'ha fet per no donar lloc a interpolacions falses en superfície.

#### *Resultats obtinguts i conclusions*

##### ***Primera fase. Prospecció més soma (menys de 6 m)***

La primera fase, en què l'abast ha estat intensivament la llera del riu, ha permès de manera ràpida i amb elevada sensibilitat determinar la situació de zones conductores relacionades amb la dissolució de les formacions evaporítiques subaflorants que provoquen la formació de cavitats i estructures de col·lapse o bòfies (vegeu la figura núm. 85, al capítol de "Prospecció gravimètrica", en la qual es comparen els resultats electromagnètics i els gravimètrics).

S'ha observat en els perfils 1, 5 i 6 un augment de conductivitat, que en part és degut a la presència de casetes i estructures antròpiques que provoquen anomalies i en part és degut a la possible presència en profunditat d'aigua circulant amb cert contingut de materials evaporítics que s'han anat dispersant amb la circulació interna d'aigua.

La presència d'evaporites s'estendria des de les zones esmentades als perfils 1, 5 i 6 almenys fins al final del canal de l'Aranyó, on les seves aigües tornen al riu Cardener.

A la llera del riu, entre el camí d'entrada i el final del canal de l'Aranyó, els mapes de conductivitat indiquen que la zona de possibles col·lapses s'estén més enllà dels materials evaporítics i entra en la zona de les margues segons el mapa geològic adjunt. Sembla possible que el límit dels materials evaporítics estaria més enllà del que s'ha marcat en aquest mapa, segons les dades obtingudes en aquest estudi.

Així mateix, en el mapa geològic hi ha un desplaçament lateral de les estructures en direcció N-S a la zona de la carretera. Aquest desplaçament lateral o possible fractura podria continuar a la zona esmentada entre el camí d'entrada a la fàbrica i el final del canal de l'Aranyó.

##### ***Segona fase. Prospecció més profunda (a partir de 7,5 m)***

En la segona fase, en què s'han utilitzat sistemes que permeten aprofundir més del que s'ha pogut en la primera fase, s'han estudiat les dues subvalls de la vall Salada i s'han realitzat dos perfils en la mateixa llera del Cardener amunt del pas de camions. Els seus resultats (que es representen a la figura núm. 83 i 84) són:

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

PERFILS 1 i 2 DE CONDUCTIVITAT ELECTROMAGNÈTICA APARENT REALITZATS AMB EM34 EN LA ZONA DEL FRIU CARDENER (inici perfils en el pont d'entrada a la fàbrica)

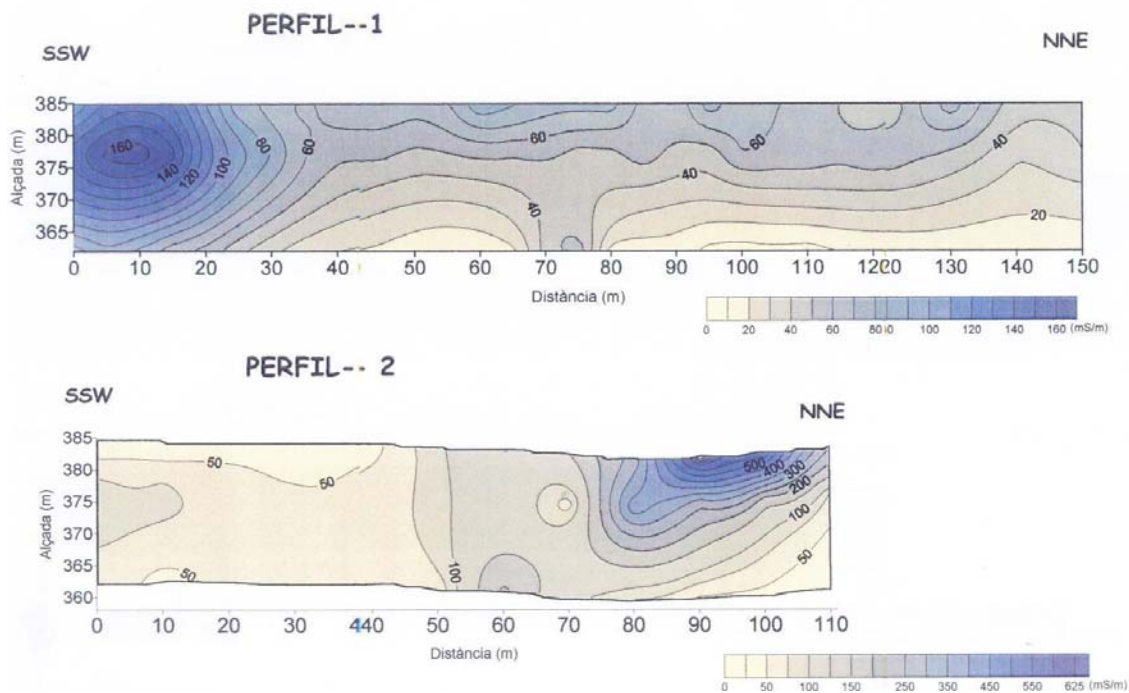


Figura núm. 83. Perfils electromagnètics 1 i 2 de la vall Salada i llera del Cardener (UB agost 1999)

PERFILS 3 i 4 DE CONDUCTIVITAT ELECTROMAGNÈTICA APARENT REALITZATS AMB EM134 EN LES VALLS SALADES DEL DIAPIR

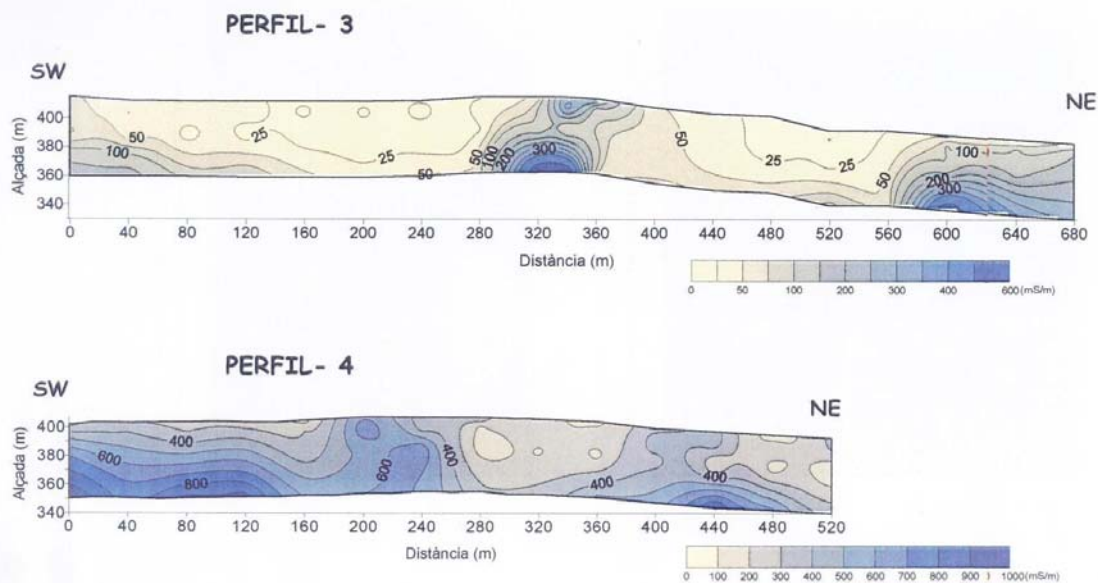


Figura núm. 84. Perfils electromagnètics 3 i 4 de la vall Salada i llera del Cardener (UB agost 1999)

En el perfil 1 s'observa una anomalia d'alta conductivitat situada a l'inici del perfil i a uns 15 m de profunditat, amb una conductivitat elèctrica aparent de 160 mS/m. S'observen anomalies a 7,5 m de profunditat i a 60 m, 95 m i 130 m de l'inici. En profunditat la conductivitat disminueix i arriba als 10 mS/m. Aproximadament entre 70 m i 80 m hi ha un augment de conductivitat en profunditat.

### 3.3.4. Prospecció electromagnètica

A l'inici del perfil 2 s'observa la mateixa anomalia que al perfil anterior però menys intensa; arriba a 80 mS/m. Fins a 50 metres la conductivitat és alta i bastant homogènia, i disminueix en superfície. En 50 metres es produeix un important gradient de 65 a 125 mS/m. A 70 metres hi ha una anomalia molt localitzada de 25 mS/m. A partir de 80 metres apareix una zona molt conductora que comença a 7,5 metres, amb una conductivitat de 600 mS/m, i disminueix en profunditat fins a 50 mS/m.

El perfil 3 comença amb una zona conductora d'uns 200 mS/m a 60 metres de profunditat que va decreixent en conductivitat cap a la superfície, on a 7,5 metres de profunditat té valors d'entre 25 mS/m i 50 mS/m. Més endavant es forma una zona de conductivitat inferior a 25 mS/m que augmenta en profunditat fins a uns 50 mS/m; aquesta zona queda interrompuda per una anomalia situada entre 280 m i 380 m de l'inici. Aquesta té una conductivitat molt alta, que arriba als 600 mS/m, i fins als 60 metres de profunditat. Després de l'anomalia comença una zona de baixa conductivitat que augmenta des de 7,5 metres fins a 60 metres de profunditat. Aquesta zona finalitza a 560 metres de l'inici, on apareix una anomalia profunda amb 500 mS/m i que disminueix fins a 50 mS/m a 7,5 metres de profunditat.

El perfil 4 té unes conductivitats molt elevades comparades amb la resta de perfils. Fins a 250 m la conductivitat arriba a 900 mS/m a 60 metres de profunditat, i disminueix fins a uns 200 mS/m a 7,5 metres de profunditat. Entre 200 m i 400 m de l'inici hi ha una anomalia formada per una pujada dels materials conductors (600 mS/m) fins a 7,5 metres de profunditat. Després d'aquesta anomalia la conductivitat disminueix i es forma una mena de conca amb conductivitats de 200 mS/m a tot el perfil en profunditat. A partir de 380 m de l'inici torna a augmentar la conductivitat i es forma una altra anomalia d'uns 900 mS/m, situada a 440 metres i a 60 metres de profunditat. Aquesta anomalia també arriba a 7,5 metres de profunditat, amb 400 mS/m de conductivitat. Des d'aquí torna a baixar la conductivitat, que arriba a 300-200 mS/m fins al final del perfil.

Les conclusions a què s'arriba en els perfils realitzats a la llera del riu Cardener (1 i 2) són les següents: la primera conclusió és que s'observa una anomalia molt propera al pont que també s'observa amb l'EM-31, però amb valors menors de conductivitat. Aquesta anomalia es troba centrada a 15 metres de profunditat i és més intensa al perfil més proper a la carretera. L'origen es pot entendre com un canvi de les propietats dels materials profunds; probablement la sal grisa present en aquest sector es troba alterada o fins i tot dissolta. Ambdós perfils travessen la zona de bòfies que hi ha a la llera del riu; el perfil 1 no es mostra gaire influenciat i, en canvi, el perfil 2 és entre 85 m i 105 m de l'inici, on apareix una potent anomalia que coincideix amb una zona entollada, que es pot considerar com a activa quant a la circulació d'aigua i possibles nous col·lapses.

La segona conclusió a què s'arriba és que, de les tres zones analitzades, el ramal sud de la vall Salada (perfil 4) és el més conductor, sobretot la part explorada més propera al diapir salí. Les conductivitats tan altes que apareixen a l'inici del perfil i a 440 metres de l'inici només es poden entendre com a degudes a una alteració molt intensa de la sal i possiblement a una dissolució.

A més de les conclusions esmentades, s'ha trobat que el ramal nord de la vall Salada (perfil 3) és menys conductor, encara que existeixen dues anomalies importants. A la primera s'ha observat la presència de sal aflorant, però també hi ha una bomba d'aigua i la línia elèctrica. Això fa que no se sàpiga concretament a què és deguda l'anomalia, si a la sal aflorant o als camps electromagnètics generats pels objectes ja esmentats. La segona anomalia és molt a prop d'una dolina reblerta, però el seu centre no està situat a la part més superficial del perfil, sinó a 60 m; és possible que estiguin relacionades, però és estrany que l'anomalia no arribi fins a 7,5 m. Probablement aquesta anomalia està relacionada amb una zona de sal alterada no relacionada amb la superfície.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLOÒGICS

#### 3.3.5. Prospecció gravimètrica

##### *Introducció a la prospecció gravimètrica*

Dins d'aquest capítol de prospecció gravimètrica s'adjunta un resum del treball realitzat l'octubre del 1999 pel Grup de Prospecció Geofísica del Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica de la Universitat de Barcelona (UB octubre del 1999). També s'incorporen dades i imatges gravimètriques en 3D del diapir de Cardona (Pinto 2002).

##### *Mètode gravimètric*

El mètode gravimètric s'utilitza en un ampli rang d'aplicacions i escales de treball en prospecció. Destaca per la seva contribució a definir a escala regional els principals trets estructurals com a suport a la cartografia geològica i l'exploració de recursos naturals. A més, es pot emprar en estudis de detall per augmentar la rapidesa i l'efectivitat de l'exploració del subsòl en determinades aplicacions geotècniques, com per exemple la detecció del subsòl en determinades aplicacions geotècniques o la detecció de cavitats.

El mètode gravimètric es fonamenta en la mesura de les pertorbacions que produeixen les heterogeneïtats de densitat del subsòl sobre el camp gravitatori terrestre. Per tant, és un mètode geofísic de camp natural o passiu.

##### *Principi del mètode*

El camp gravitatori és un camp potencial, és a dir que obeeix les equacions de Laplace. Les seves magnituds són funció d'un canvi en l'energia potencial i, en conseqüència, les magnituds depenen de la posició relativa entre els cossos anòmals i el punt de mesura.

La gravimetria es fonamenta en la llei de Newton i es basa en observacions empíriques. La seva expressió és:

$$F_g = G \frac{mM}{r^2}$$

que expressa la força,  $F_g$ , d'atracció en dines entre dues masses puntuals, metres i metres en grams, que estan separades per una distància  $r$  en centímetres, sent  $G$  la constant d'atracció universal; el seu valor en el sistema CGS és de  $6.673 \cdot 10^{-8}$ .

La unitat d'acceleració de la gravetat en el sistema CGS és el  $\text{cm}/\text{seg}^2$  que, per honorar Galileu, en geofísica s'anomena *gal*. En els estudis de prospecció geofísica, com que les variacions de gravetat mesurades són molt petites, s'utilitzen submúltiples d'aquesta unitat, com el mil·ligal o el microgal, les equivalències dels quals són:

$$1 \text{ gal} = 0,001 \text{ gals}$$

En el SI la unitat d'acceleració és el  $\text{m}/\text{seg}^2$ , però, com que aquesta unitat és també massa gran, s'utilitzen dos submúltiples, que són la unitat gravimètrica (u. g.) i el  $\text{mm}/\text{seg}^2$ . Les relacions de conversió amb les unitats del sistema CGS són:

$$1 \text{ u. g.} = 0,1 \text{ mGal}$$

$$1 \text{ mm}/\text{seg}^2 = 0,001 \text{ mGal}$$

En aquest estudi, tenint en compte la densitat de les litologies presents, s'ha utilitzat com a densitat de reducció  $2,55 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

Per garantir l'homogeneïtat de les mesures d'aquesta campanya amb totes les mesures preexistents a l'àrea d'estudi, s'han enllaçat mitjançant diferents itineraris amb les bases gravimètriques més properes establertes amb motiu de la realització del mapa gravimètric de Catalunya (Casa, et al.), que són:

Manresa, catedral                      980.240,01 mGal

Solsona, catedral                      980.145,85 mGal

El resultat final és l'obtenció de l'anomenada *anomia de Bouguer*, que es pot definir com la diferència entre el valor de la gravetat observat i la gravetat teòrica calculada sobre l'el·lipsoide i corregida a les condicions de la mesura experimental. El valor de l'anomia de Bouguer és, doncs:

$$AB = Gobs - (Gt - 0,3086 \cdot h + 0,04191 \cdot d \cdot h - ct)$$

### 3.3.5. Prospecció gravimètrica

On:

<i>Gobs</i>	és la gravetat observada
<i>Gt</i>	és la gravetat teòrica sobre l'el·lipsoide
<i>h</i>	és l'altitud de l'estació
<i>d</i>	és la densitat mitjana del terreny
<i>ct</i>	és la correcció topogràfica

Les mesures gravimètriques s'han executat seguint l'anomenat *sistema de cicles*, és a dir que cada mesura o grup de mesures s'ha realitzat entre dues mesures en una mateixa base. La diferència entre les mesures en la mateixa base a l'inici i el final d'un itinerari, un cop aplicada la correcció de marea lunisolar, ha permès conèixer i compensar l'efecte de deriva instrumental. En la majoria dels itineraris la deriva instrumental ha estat inferior a 0,2 mGal/hora.

#### *Material emprat*

El gravímetre de subsòl utilitzat és un Lacoste & Romberg Inc. model G-831, que opera a temperatura constant de 48,5 °C. Aquest model té mesures de 7.000 mil·ligals, una precisió de +/-0,01 mil·ligals i una deriva instrumental teòrica d'1 mil·ligal per mes.

Aquest gravímetre està preparat per eliminar qualsevol efecte en els canvis en la pressió atmosfèrica. Com a mesura de precaució, té la pressió interna compensada. El sensor està completament desmagnetitzat i segellat sense cap camp magnètic.

El posicionament de les estacions de mesura de camp gravitatori ha estat realitzat per l'empresa TOYSE (Topografia y Servicios) amb un GPS (sistema de posicionament global) marca Leica de precisió en dinàmic de  $x, y, z$  al centímetre.

#### *Resultats obtinguts i interpretació de les dades*

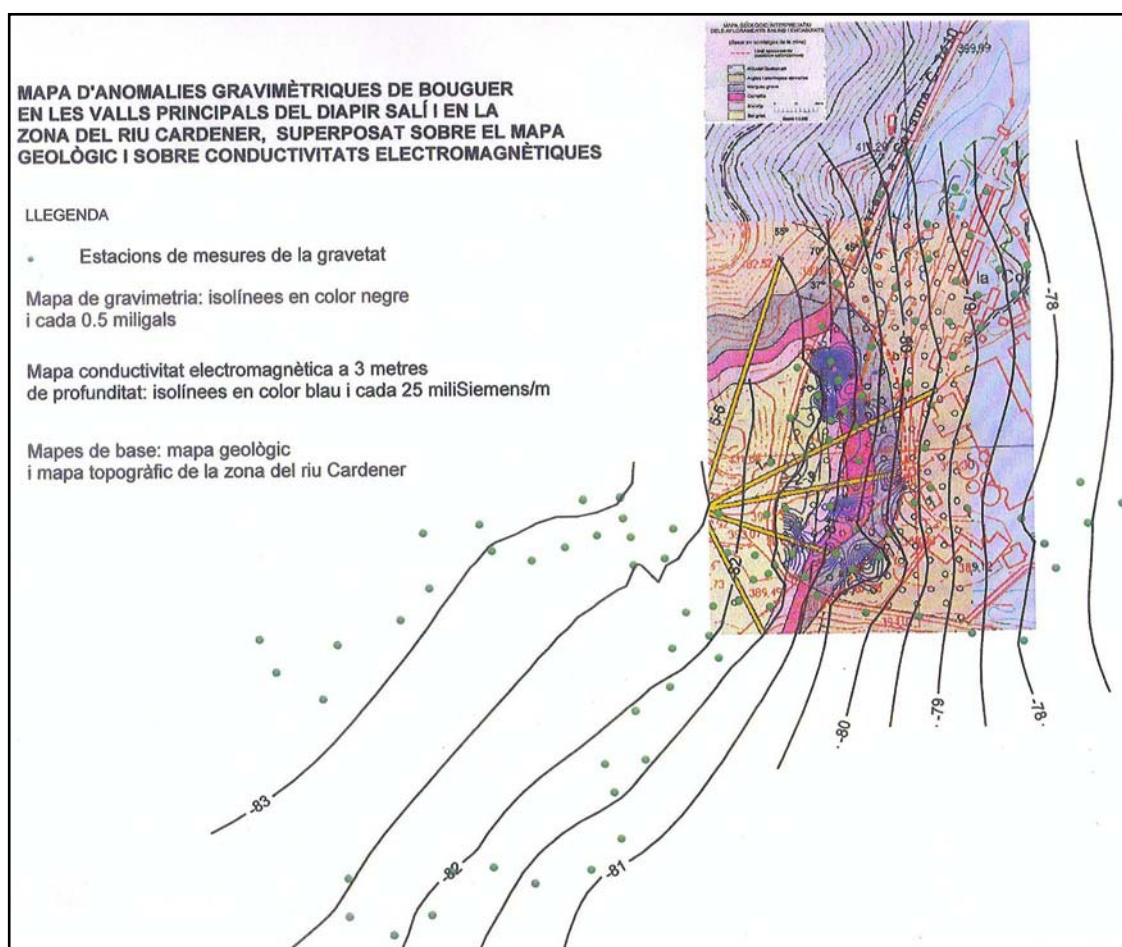
S'han fet mesures de gravetat al llarg del riu Cardener entre el petit embassament i el pont d'entrada a la depuradora. També s'han pres mesures de gravetat en les dues valls principals que entren cap al diapir salí. S'han distribuït d'aquesta manera les estacions per cobrir al màxim tota l'àrea d'estudi. A la figura núm. 85 s'observa la situació de les estacions juntament amb els resultats obtinguts.

A la mateixa figura núm. 85 s'ha fet el mapa de les anomalies gravimètriques de Bouguer. Les anomalies de Bouguer es generen per les estructures geològiques més superficials, com en aquest cas és el diapir salí. Els valors de les anomalies de Bouguer són més negatius (mínim de -83 mil·ligals, zona de la mina de Sant Onofre i de can Manel), que és la zona central del diapir salí. A mesura que ens allunyem del centre del diapir els valors gravimètrics augmenten fins al màxim de -77 mil·ligals prop de la fàbrica de sal. Aquest augment de valors gravimètrics indica l'aprimament del diapir salí. L'acabament lateral del diapir salí és progressiu, però sembla que es nota més a la zona del riu Cardener, on és definit a partir del màxim gradient en mil·ligals, és a dir, allà on les isolínies estan més juntes. Per tant, la zona on hi ha les isolínies més juntes és la zona que correspon a l'àrea de la llera del riu Cardener.

#### *Comparació entre la prospecció gravimètrica i la electromagnètiques*

En aquest apartat es presenta una comparació entre els resultats obtinguts en aquest reconeixement i les interpretacions fetes a partir de les dades obtingudes en els reconeixements mitjançant cales electromagnètiques EM-31 i EM-34, que es van dur a terme el juliol del 1999 i l'agost de 1999, respectivament. A la figura núm. 85 s'han superposat els mapes d'anomalies de gravetat i els de conductivitat electromagnètica.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



**Figura núm. 85. Resultats de la prospecció gravimètrica conjuntament amb els de prospecció electromagnètica (UB octubre 1999)**

La zona que s'ha definit com el límit del flanc oriental del diapir correspon a l'àrea del riu Cardener, com ja s'havia posat de manifest. Les anomalies gravimètriques coincideixen amb les dades de conductivitat electromagnètica dels estudis anteriors. Així, les zones més conductives a 3 metres de profunditat corresponen a la zona de màxim gradient de gravetat i també corresponen a la zona més conductiva del perfil 2 de conductivitat electromagnètica.

L'elevada conductivitat electromagnètica que es reflecteix a l'inici del perfil 1 i al final del perfil 3 no coincideix amb el límit del diapir més important delimitat amb la gravimetria i és deguda a altres factors geològics associats al diapir salí.

#### *Conclusions*

Els resultats de la prospecció gravimètrica coincideixen amb les interpretacions fetes a partir de les dades electromagnètiques d'informes anteriors, però permeten afinar més el model geològic.

La gravimetria ha permès definir amb més claredat el límit oriental del diapir salí a la zona del riu Cardener. Encara que el diapir s'enfonsi progressivament, i per tant, que el límit lateral del diapir no sigui vertical, el contacte més superficial sembla correspondre a la zona on les isolínies estan més juntes, és a dir, al màxim gradient.

La gravimetria indica que la possible zona de dissolució (límit diapir) seria més a l'oest del que es pensava abans.

Els resultats dels estudis per prospecció electromagnètica confirmen també aquest límit més cap a l'oest, i a més a més les bòfies que s'han desenvolupat actualment en aquest sector també ho

### 3.3.5. Prospecció gravimètrica

confirmen. En aquesta àrea, entre la corba de l'antiga carretera i el final del canal de l'Aranyó, podria existir alguna fractura radial del diapir, ja que les isolínies de gravimetria no segueixen la tendència general de l'estructura de la zona.

La captura de la mina pel riu Cardener també es fa evident a la zona de la corba de l'antiga carretera a partir de les dades d'electromagnètica de profunditat amb la cala EM-34. El final del perfil 3 indica una alta conductivitat a certa profunditat derivada de la circulació d'aigua amb sals dissoltes.

L'inici del perfil 1 realitzat amb la cala electromagnètica EM-34 no coincideix gaire amb les dades obtingudes a 3 metres de profunditat amb la cala EM-31. En el perfil 1 la conductivitat és molt més elevada. Una explicació d'això pot ser que l'estudi amb la cala EM-34 es va realitzar més tard i les condicions del terreny havien canviat (pluges i majors dissolucions). Però les dades de la cala EM-34 a l'inici del perfil 1 es confirmen amb un important col·lapse en aquesta àrea, fet que indicaria la circulació d'aigua subterrània amb alt poder de dissolució.

Estudis d'altres autors més recents i a partir de 320 estacions gravimètriques arriben a la conclusió que el diapir de Cardona (Pintó et al. 2002) presenta una anomalia gravimètrica negativa que s'estén cap al SO, seguint l'anticlinal de Pinós-Cardona (vegeu figura núm. 86). Es pot observar que el diapir presenta una certa vergència cap al sud, amb un sostre que cabussa fortament cap al SE i d'una manera més suau cap al NO.

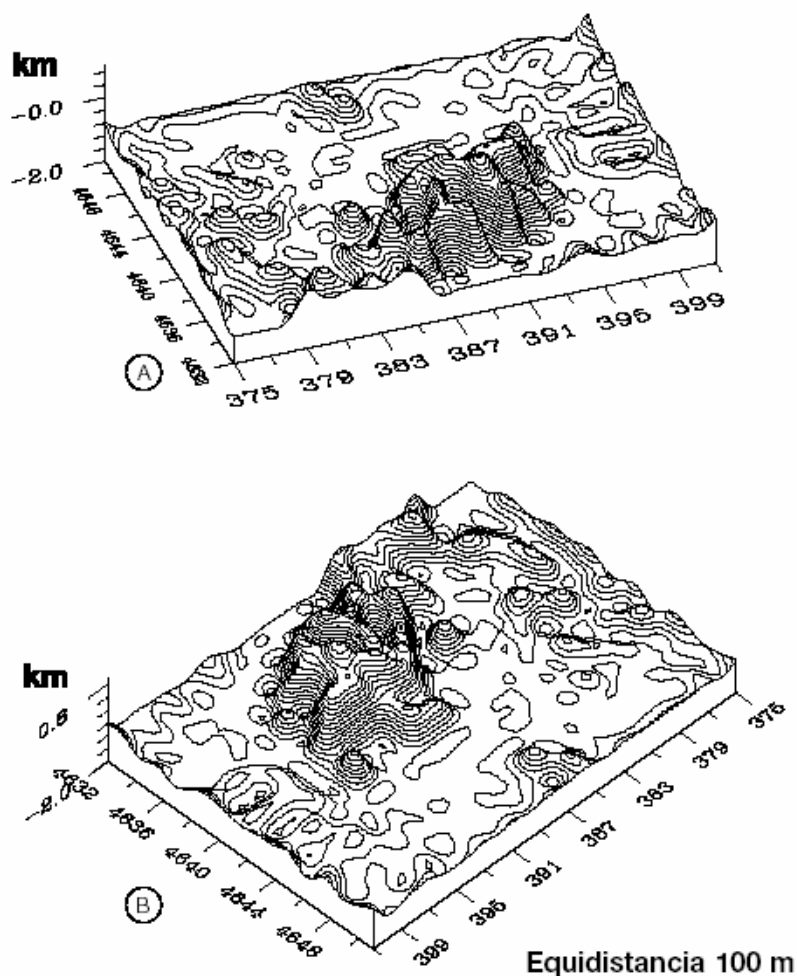


Figura núm. 86. Perspectives del sud cap al nord (A) i del nord cap al sud (B) del model tridimensional de densitats del diapir de Cardona, obtingut per inversió del mapa d'anomalies residuals (extret de Pintó et al. 2002)



### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

#### 3.3.6. Sondejos mecànics

Existeixen diferents campanyes de sondejos des de principis del segle XX, quan la Sociedad de Industria y Comercio, filial de la Unión Española de Explosivos, va realitzar tres pous de petit diàmetre per al reconeixement de potassa a la zona de Cardona, així com diferents perforacions a la Muntanya de Sal, que van revelar la presència de silvinita en masses d'important riquesa, fins als darrers sondejos del 2004 per esbrinar la captació d'aigua residual al llarg de la llera abandonada del Cardener.

A continuació s'exposa aquella informació relativa al comportament de l'aigua a la zona de la rodalia de la vall Salada. En els annexos es podran veure detalls dels sondejos que es resumeixen aquí.

#### *Sondejos històrics*

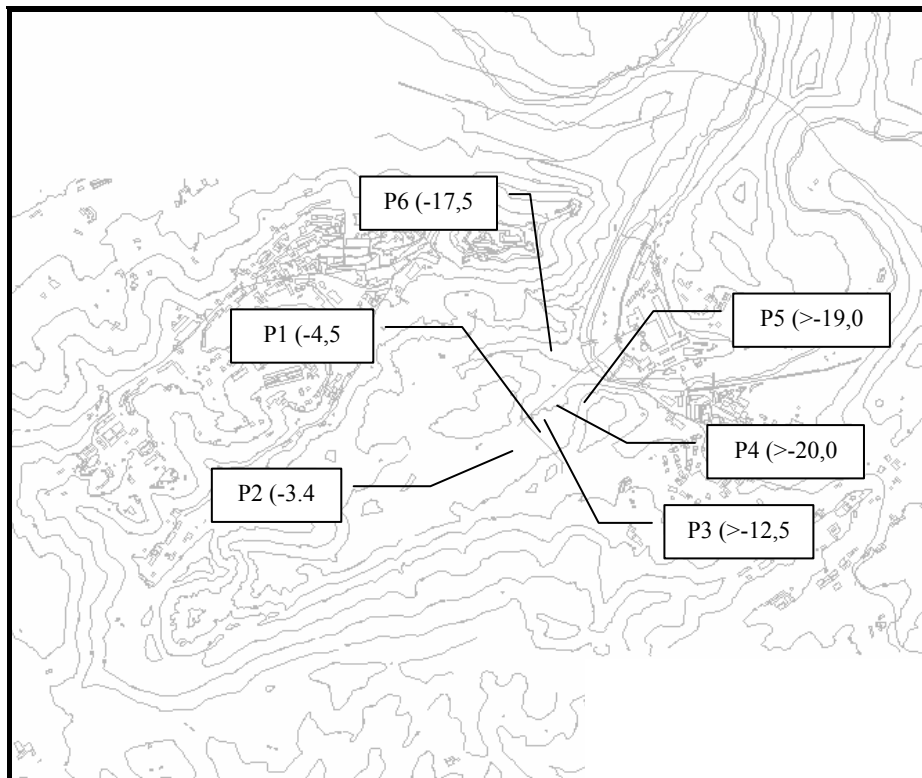
Seguint la descripció del full de Cardona del mapa geològic d'Espanya de l'IGME i comunicacions verbals de tècnics de les empreses mineres, es resumeixen els sondejos següents:

- Pou Manuela. Situat dins de l'actual recinte de la fàbrica la Coromina. Gairebé tenia 100 metres de profunditat. No van tocar la sal que aflora a tan poca distància. Es va haver d'abandonar per importants vies d'aigua i perquè es va trobar una falla tangent.
- Pou Nieves. Situat darrere de les salines, tampoc no va ser afortunat.
- Dos pous a la mina Romana. Situats al vessant sud vertical del diapir. Sense trobar la sal, encara que estiguessin a prop de l'aflorament salí.
- Sondeig Cardona I (o de Llardella). Construït el 1920 i situat a uns 8 km de Cardona, al costat de la casa Llardella i a 350 metres de l'eix anticlinal de Cardona, amb cabussaments molt forts. La sal va aparèixer als 1.477 m, la sal i carnal·lita als 1.514 m i la silvinita als 1.573 m.
- Sondeig Cardona II. Al nord de Cardona, entre el riu i la carretera a Solsona, i en el km 35,5 al costat del límit de província. Es va arribar a 1.200 metres de profunditat sense trobar la formació salina.
- Pous Alberto i María Teresa. A la mina Nieves. Començat per UERT el 1925; l'explotació va començar el 1929. El pou Alberto arriba al nivell de 780 metres i estava prolongat per un contrapou fins als 1.020 m. Estan emplaçats sobre les margues roges i gresos del vessant NO de la bòfia Gran, cabussant 32 ° al NO. S'entra en la sal massiva a partir dels 247 metres i les primeres capes de silvinita es troben per sota de la cota de 484 m. En el nivell de 80 metres hi ha la galeria de la Minilla, que talla una falla inversa i posa en contacte anormal la sal sobre les margues salobres amb anhidrita que pertanyen al sostre d'aquesta.
- Sondeig Foraky. Situat a uns 600 m a l'est de la fàbrica Manuela. Va travessar margues amb anhidrita i sal des de 600 m fins a 650 m, i va travessar la primera capa de carnal·lita amb halita als 1.020 m.
- Sondeig Marbà. Situat al sud de la bòfia Gran, al costat de la casa del mateix nom, i sobre l'eix de l'anticlinal sud. Va arribar a partir de 100 metres a capes molt inclinades del membre lacustre i no es va poder trobar la sal.

### 3.3.6. Sondejos mecànics

#### *Sondejos a la vall entre el 1984 i el 1992*

A fi d'investigar el subsòl de la vall Salada per a la captació de la salmorra d'origen natural que aflorava al rierol Salat, la Direcció General d'Obres Hidràuliques de la Generalitat de Catalunya va començar a estudiar-lo mitjançant una campanya de sondejos, realitzada el 1984 per Geoconsulting (vegeu la figura núm. 87).



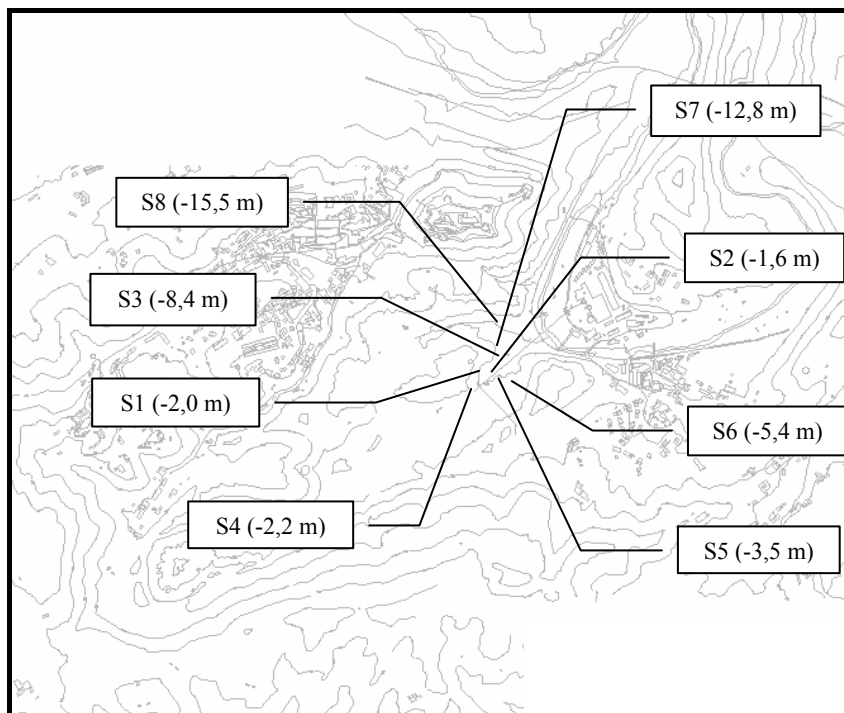
**Figura núm. 87. Emplaçament dels sondejos realitzats per Geoconsulting el 1984, amb indicació de la profunditat (entre parèntesis) a la qual es va trobar la formació salina**

#### *Sondejos a la vall el 1993*

Amb l'objectiu d'investigar el subsòl de la vall Salada a fi de construir una captació d'aigües salades que substituís una construcció amb caràcter provisional existent, Geoconsulting va realitzar sis sondejos, entre els dies 10 i 17 de desembre de 1992, amb recuperació de testimoni continu. El resum es pot veure a la figura núm. 88.

A partir de les dades aconseguides amb aquests sondejos, conjuntament amb les dels realitzats per la mateixa empresa l'any 1984, es van poder dibuixar les seccions geològiques de les figures núm. 117 i 118.

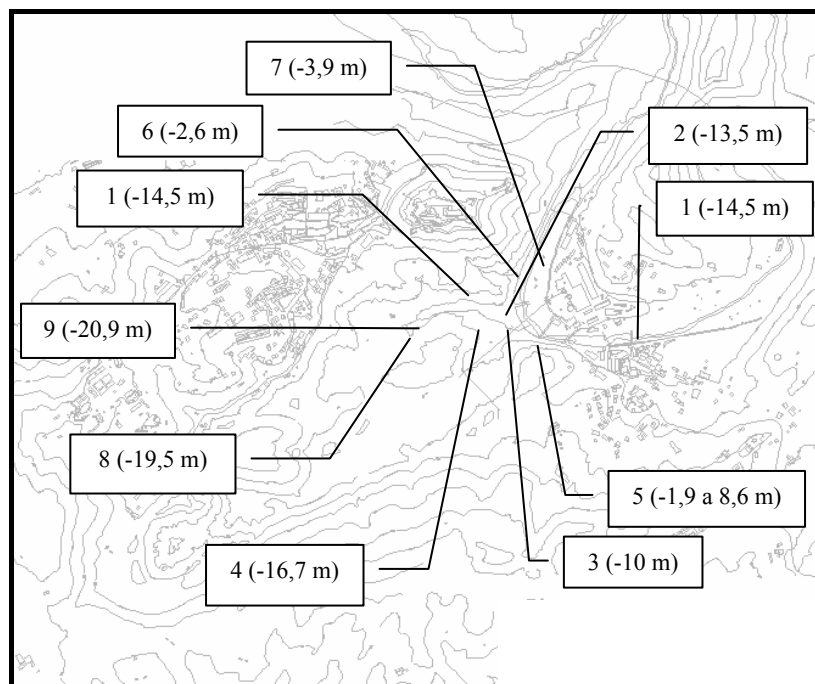
### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



**Figura núm. 88. Emplaçament dels sondejos realitzats per Geoconsulting el 1993, amb indicació de la profunditat (entre parèntesis) a la qual es va trobar la formació salina**

#### *Sondejos pel dipòsit controlat de residus el 1997*

Amb motiu de l'estudi de viabilitat d'un dipòsit subterrani controlat de residus especials a l'antiga mina de sal de Cardona, realitzat el 1997, es va fer una campanya especial de sondejos mecànics en testimoni continu. En aquesta campanya de sondejos es van determinar conductivitats elèctriques de les seves aigües en diferents dates i a tot el llarg dels sondejos. També es van realitzar assajos de bombejos amb preses de nivells en els pous confrontants.

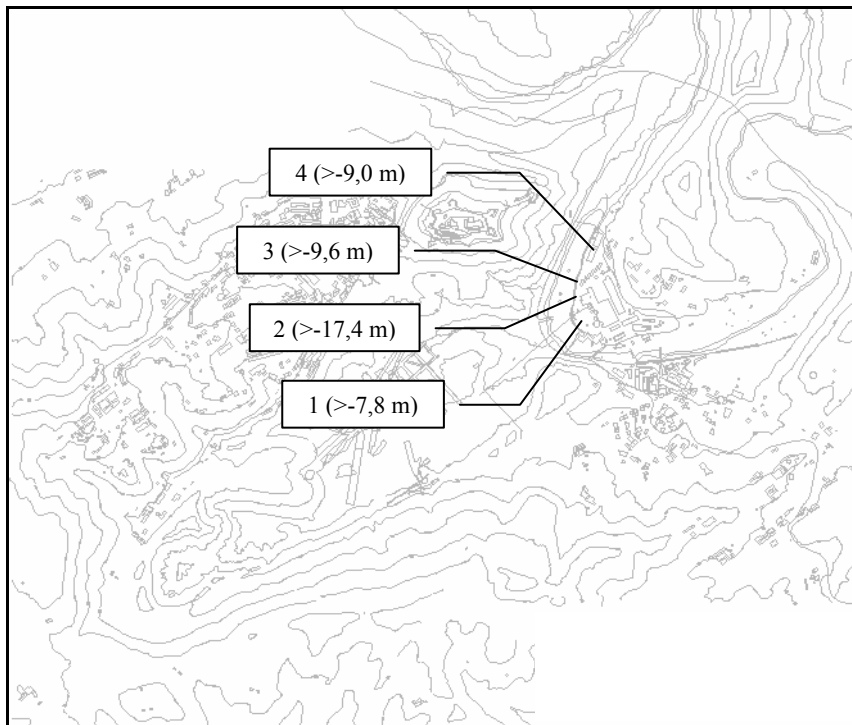


**Figura núm. 89. Emplaçament dels sondejos realitzats el 1997 amb motiu de l'estudi per determinar la viabilitat d'un abocador de residus especials, amb indicació de la profunditat (entre parèntesis) a la qual es va trobar la formació salina**

### 3.3.6. Sondejos mecànics

#### *Piezòmetres al costat del canal de l'Aranyó el 1999*

Amb motiu del control de les aigües del riu Cardener que s'introduïen a la mina Las Salinas, es van construir quatre piezòmetres al llarg del canal de l'Aranyó. En aquest cas, i fet expressament, no es va arribar als materials salins (vegeu la figura núm. 90).



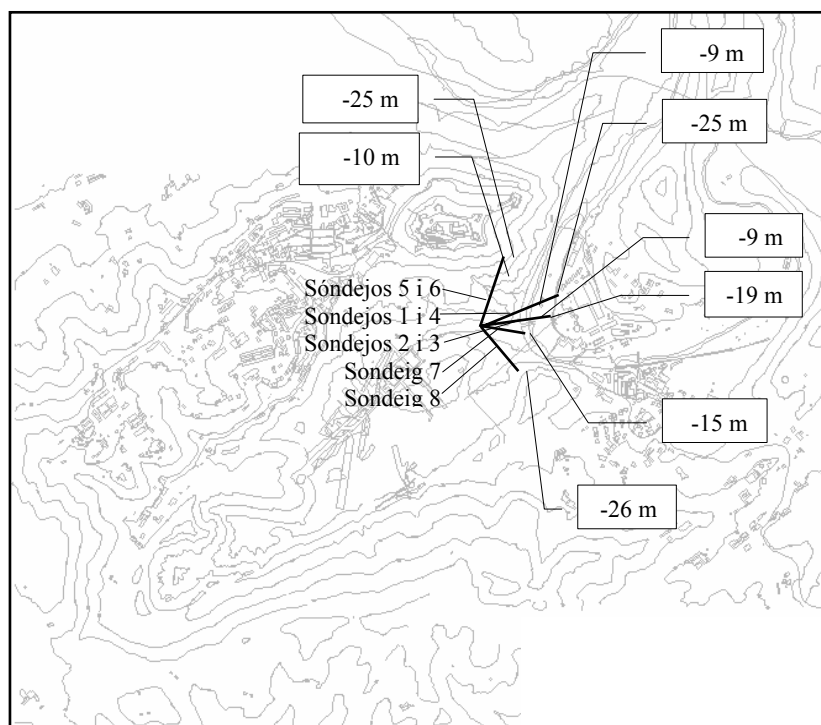
**Figura núm. 90. Emplaçament dels piezòmetres construïts per al seguiment del nivell del Cardener quan entrava l'aigua a la mina, durant el període del 1999 a mitjan any 2000**

#### *Sondejos inclinats*

La Junta d'Aigües de la Generalitat de Catalunya va redactar un informe el maig del 1999, en el qual va utilitzar uns sondejos inclinats antics, alguns dels quals estaven duplicats amb diferents inclinacions. Es pensa que aquests sondejos inclinats els va fer l'empresa Unión Española de Explosivos Río Tinto, encara que es desconeix l'any de construcció.

La zona en què es van construir aquests sondejos és la confluència de la vall Salada amb el riu Cardener. Aquesta zona és on el diapir s'enfonsa sota la fàbrica Manuela. D'aquesta manera, s'aporta un coneixement més acurat de la disposició vertical de la geometria dels materials salins (vegeu la figura núm. 91).

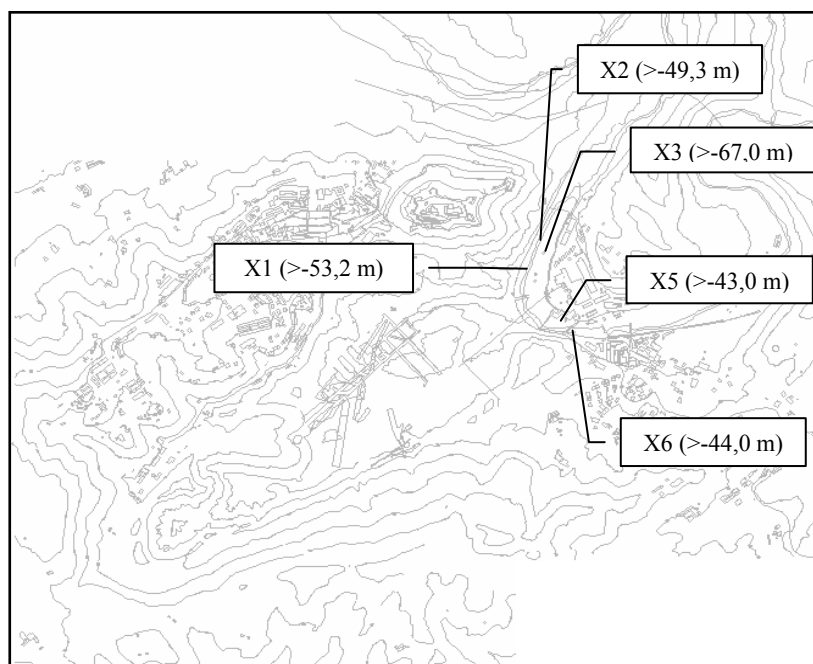
### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS



**Figura núm. 91. Sondejos inclinats en la confluència de la vall Salada amb el riu Cardener. Està dibuixada la projecció i en aquest cas hi ha indicades les profunditats a les quals s'han trobat els materials suprasalins**

#### *Sondejos a la llera abandonada del Cardener el 2004*

L'empresa explotadora de la mina de sal gemma Las Salinas, motivada per l'encara entrada d'aigua salmorra a la rampa de Sant Onofre, on a la cota 300 té una bomba d'extracció que transporta aquesta aigua al col·lector de salmorres, va fer construir uns sondejos de reconeixement (tardor del 2004). El resum d'aquests sondejos (vegeu-ne l'emplaçament a la figura núm. 92) es poden veure a l'annex de sondejos.



**Figura núm. 92. Emplaçament dels sondejos de reconeixement amb indicació de la profunditat màxima que s'ha excavat i amb els quals no s'han trobat materials salins**

### 3.3.7. Assajos amb traçadors

#### 3.3.7. Assajos amb traçadors

##### *Introducció als assajos amb traçadors*

Al llarg d'aquests darrers anys s'han realitzat diversos assajos de continuïtat de les aigües amb traçadors (Antich et al. 2000, 2001), que afluïren a la superfície i s'infiltra cap a l'interior de la mina. A fi de confirmar hipòtesis de la circulació càrstica, allà on no s'ha pogut visitar físicament, s'ha intentat colorar les aigües superficials amb forts colorants a manera de traçador (Mor Benedito, Salbidegoitia 1970, Smith, Soler et al. 2002). Moltes vegades no han donat cap fruit.

##### *Primers assajos amb traçadors*

Els primers escrits de l'existència d'assajos amb traçadors a la vall Salada són de l'any 1985, quan va entrar aigua a la rampa de Sant Onofre. Aleshores es va abocar fluoresceïna a diferents punts (bòfia de la terrera Vella, boca de mina al costat de la rampa de Sant Onofre) i es van identificar connexions ràpides entre els punts d'injecció i la rampa (menys d'un dia).

##### *Assajos de traçadors el 1997*

El 1997 es van realitzar assajos amb traçadors que van consistir a injectar una massa coneguda de colorant en punts identificats com a entrades preferents al sistema càrstic (dolines amb circulació d'aigua o seques).

La setmana en què es van fer els assajos (del 23 al 29 de juny de 1997) va ser després d'un període relativament sec. Només es van produir dos xàfecs, un la nit del 26 al 27 i un el dia 29. La taula núm. 22 resumeix les condicions d'injecció i la taula núm. 93 les de mostreig. La figura núm. 93 en mostra la situació.

Els punts de mostreig han estat per a tots la surgència de Sant Onofre, a la canonada metàl·lica i a l'entrada del col·lector de salmorres. En aquest punt hi desembocava el bombejament del pou de Sant Onofre. El cabal de la surgència es va mantenir molt constant durant tota la setmana al voltant de 5 l/s, excepte el dia 29 després de les pluges, on s'havia desbordat l'aforador. L'entrada de l'aigua del pou al col·lector va estar submergida, durant bona part del temps que van durar els mostresjos, a causa d'una deficiència en el sistema de bombejament del col·lector de salmorres (personal AGBAR, com. pers.), per la qual cosa les mostres són una barreja del pou i de la surgència.

Els punts d'injecció es van seleccionar per identificar zones preferents d'entrada d'aigua (eosina i blau de metilè en bòfies amb circulació d'aigua). Amb injecció de fluoresceïna es pretenia veure si el flux a través de la cobertura argilosa podia ser concentrat en alguns trams i sortir preferentment al pou de Sant Onofre. La injecció del verd brillant pretenia cobrir el flanc nord-est del turó de Sant Onofre i veure si l'aigua que s'infiltrava allà també drenava cap al riu Cardener.

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

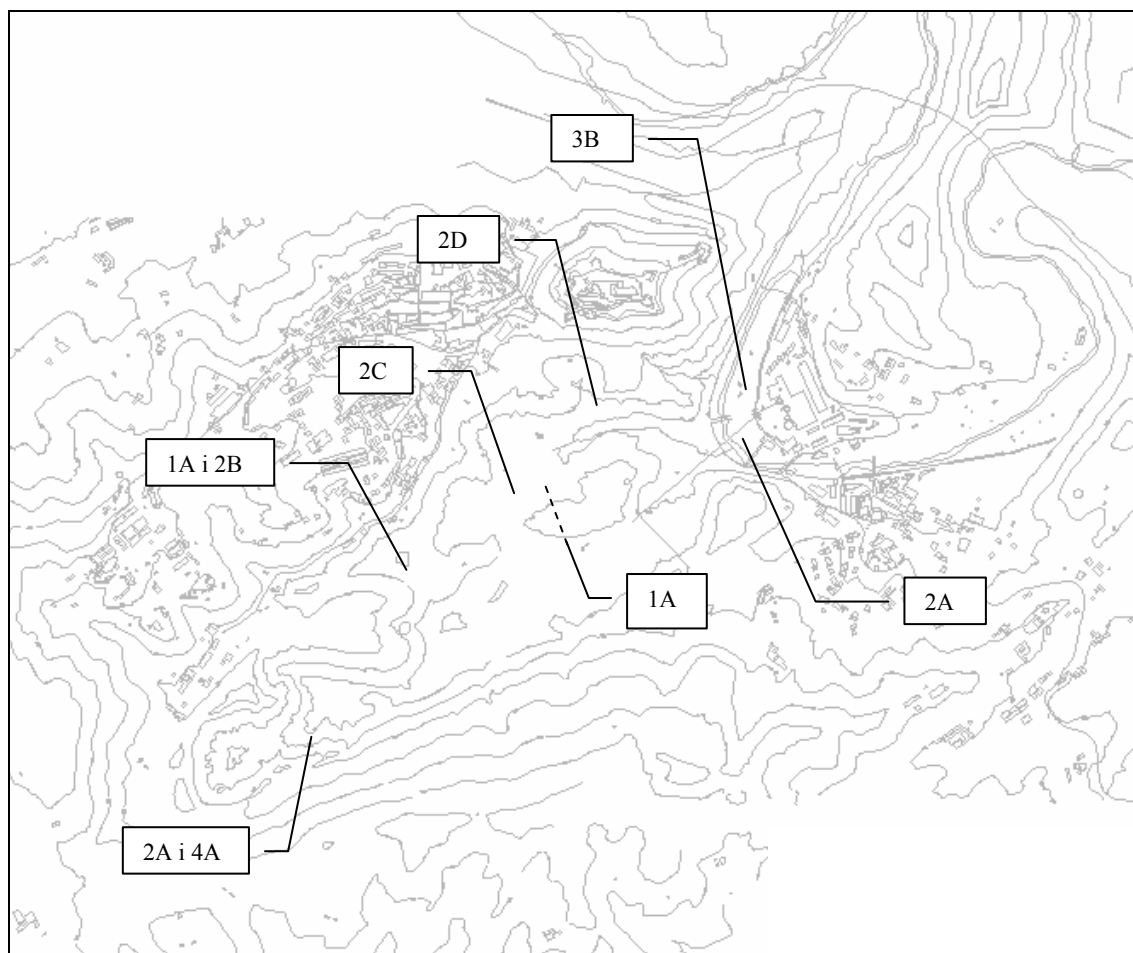


Figura núm. 93. Punts d'injecció i de mostreig dels traçadors (UPC 1997)

Punt d'injecció	Massa del traçador	Condicions d'injecció	Dia i hora
Bòfia petita al costat de la mina turística on s'escola l'aigua que sorgeix del forat Micó	450 g d'eosina Y CI 45380 Acid Red 87 Disodium sal (17372-87-1) $C_{20}H_6Br_4O_5Na_2$	Dilució al curs superficial (aprox. 5 l/min amb 50 l d'aigua dolça durant 15 min).	23/6/1997 12.00
Bòfia lateral de la terrera antiga	400 g de blau de metilè CI 52015. Clorur de metiltionini trihidratat (7220-73-3) $C_{18}H_{18}ClN_3S_3 \cdot 3H_2O$	Dilució al curs superficial (aprox. 0,5 l/min) amb 50 l d'aigua dolça durant aprox. 15 min.	24/6/1997 14.00
Forat al mig de la plana de cal Manel (hipòdrom)	500 g de fluoresceïna sòdica CI 45350 Acid Yellow 73 Sodium sal (518-47-8) $C_{20}H_{10}O_5Na_2$	Es va practicar un sondeig manual que va travessar un metre de sorres i argiles i 0,5 metres d'argila plàstica. Es va clavar un tub de PVC fins al fons i es van injectar primer 50 l d'aigua dolça, després el traçador diluït amb 100 l d'aigua dolça i finalment 50 l d'aigua dolça, durant aprox. 15 min.	24/6/1977 14.45
Bòfia al turó de Sant Onofre, al sector més NE, davant del castell	100 g de verd brillant CI42040 Basic Green (633-03-4) $C_{27}H_{34}N_2O_4S$	Es va introduir un tub de PVC fins al fons de la bòfia (aprox. un m). Es van injectar 100 l d'aigua dolça, després el traçador diluït en 50 l d'aigua dolça i finalment 100 l més d'aigua dolça.	24/6/1997 15.30

Taula núm. 22-. Condicions d'injecció de l'assaig del 1997 (UPC)

### 3.3.7. Assajos amb traçadors

<b>Dia</b>	<b>23/6/1977</b>	<b>24/6/1997</b>	<b>25/6/1997</b>	<b>26/6/1977</b>	<b>27/4/1997</b>	<b>29/6/1997</b>
Hora dia	12 14 16 19 21 23	1 7 9 12 15 18	8 11 15 18	9 12 16	9 12 18	12
Eosina	0 2 4 7 9 11	13 19 21 24 27 30	44 47 51 54	69 72 78	95 98 104	146
Blau de metilè		1 4	18 21 25 28	43 46 52	69 72 80	122
Fluoresceïna		3	17 20 24 27	42 45 51	68 71 79	121
Verd brillant						

Notes: la primera fila són els dies de la setmana durant els quals es va mostrejar. La segona fila són les hores del dia en què es van prendre mostres. Les altres quatre files són els temps de mostreig en hores des de la injecció del traçador corresponent. A efecte pràctic, es considera que la fluoresceïna i el verd brillant es van injectar simultàniament (menys d'una hora de diferència).

**Taula núm. 23. Dades del mostreig de l'assaig del 1997 (UPC)**

Els resultats dels assajos no van poder ser més descoratjadors. Cap de les 46 mostres preses (23 + 23) no va mostrar el més petit indicatiu de traçador. Els fluorescents eosina i fluoresceïna s'han analitzat per espectrofluorimetria i no s'han detectat concentracions superiors als  $10^{-8}$  mol/l, cosa que equival a dir que, després d'una setmana, la recuperació va ser nul·la. Les hipòtesis per explicar-ne els resultats són diverses. Dels dos assajos en zona no saturada (fluoresceïna i verd brillant), el més probable és que el traçador encara no hagi entrat en zona saturada i que el flux sigui molt més lent que el que s'esperava i es donen temps de residència superiors a una setmana. Els dos d'injectats en aigües salades a l'entrada de bòfies poden haver estat retinguts pels residus insolubles propis del carst (argiles), amb la qual cosa no apareixen. De fet, se sap que els colorants solen presentar problemes d'absorció en materials fins, o en la fase sòlida o en partícules en suspensió (Smart i Laidlaw 1977). Abelin et al. (1987) fan assajos més específics amb eosines, però en materials granítics, i les consideren compostos estables (no degradades en el temps) i adequades per a aquest tipus de medi.

La no-recuperació dels traçadors es pot associar també a un règim hidrològic de semiestiatge o a canvis en les condicions de contorn respecte els assajos esmentats anteriorment. En el primer cas, l'aigua en règim torrencial en què es van fer els primers assajos (pluges de l'ordre de 50 mm/dia abans de l'accident) pot circular per un sistema de drenatge diferent d'aquell pel qual ho faria en règim d'estiatge, on només una part dels conductes preferencials són actius.

Les condicions de contorn actual respecte a les de dotze anys enrere poden haver canviat, així com la geometria. Canviant el nivell de base del carst vers el riu (més aixecat), el drenatge de Sant Onofre podria ser actiu només per a les aigües més superficials, mentre que la circulació més profunda que descarregaria directament al riu Cardener podria esdevenir més important. La geometria dels conductes càrstics també podria haver canviat.

#### *Assajos de traçadors el 1999*

Amb motiu d'entrades massives d'aigua del riu i d'incrementos puntuals de cabals a la mina relacionats amb problemes en el funcionament del canal de l'Aranyó, a primers de gener del 1999, quan s'intentava desviar l'aigua del riu cap a aquest canal, tècnics de la Junta d'Aigües van dur a terme dues experiències (Junta d'Aigües 1999).

La primera experiència d'aquells dies va ser negativa.

Aquesta primera experiència va consistir a injectar 1.535 g de fluoresceïna en una cisterna de 18.000 l de salmorra en una de les bòfies de la llera del riu aigües avall de la cinta transportadora. Es va controlar l'aigua que entrava a la mina Las Salinas i el resultat va ser nul.

En canvi, el dia 16 de març es va realitzar una altra experiència que va consistir a provocar una crescuda controlada del riu, que va donar resultats positius.

Durant 70 minuts, una mitjana d'uns 175 l/s d'aigua del canal de l'Aranyó es van desviar cap a la llera del riu Cardener. Aquest desviament es va fer de manera que tota l'aigua (uns 700 m<sup>3</sup>) s'infiltrava abans d'arribar al gual dels camions. Una part important de la infiltració es produïa a través d'una única bòfia. En el moment en què l'aigua començava a arribar a aquesta bòfia, es van injectar 676 g de fluoresceïna prèviament dissolts en 25 l d'aigua.

Per al seguiment de l'experiència, a la sala de la mina on arribava l'aigua (Silo) es va instal·lar una unitat digital d'adquisició de dades (*datalogger*), a la qual es va connectar una sonda de nivell i una de temperatura de l'aigua. Això va permetre enregistrar les dades horàries d'aquests dos paràmetres durant el desenvolupament de l'experiència.



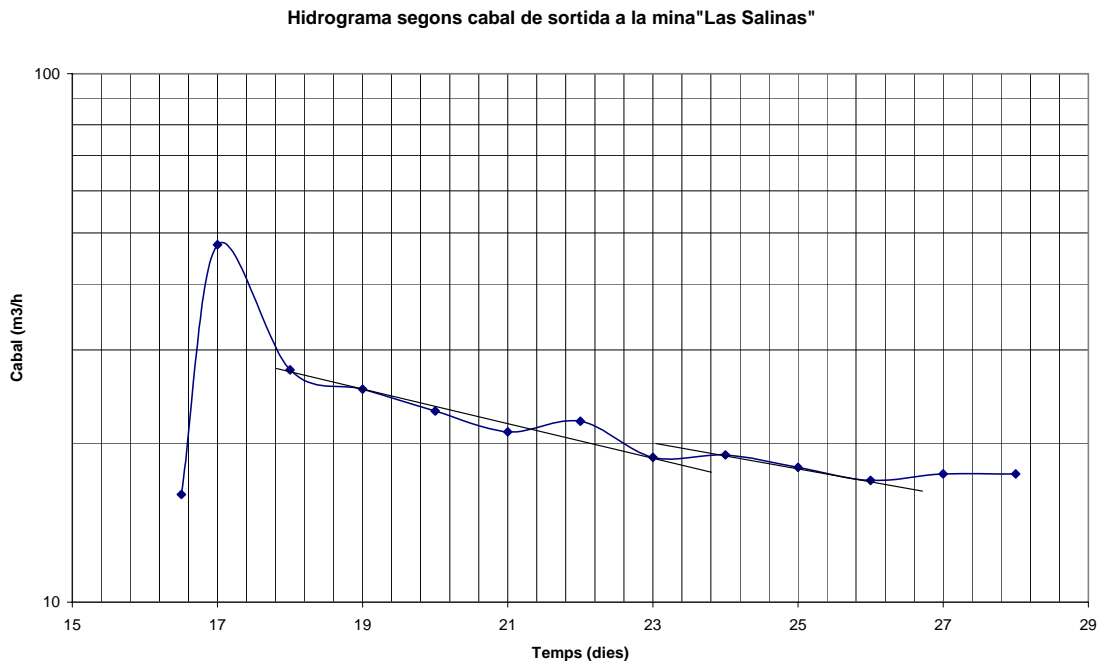
### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS

En aquest mateix punt es van recollir mostres d'aigua a intervals regulars (mostrejador automàtic) per determinar la conductivitat i la concentració de fluoresceïna.

El resultat d'aquesta experiència és doble: per una banda, s'avalua el comportament de l'aigua subterrània davant d'una crescuda del riu, i per altra banda, se sap què passa amb la fluoresceïna.

En relació amb la crescuda controlada i la seva influència en el cabal que arriba al Silo de la mina Las Nieves, s'observa que al cap de menys de mitja hora d'haver obert el pas d'aigua cap al riu ja hi ha un increment del nivell d'entrada. És interessant destacar que l'increment del cabal a la mina s'estén fins a més de 24 h des del tancament del pas de riu per la llera, la qual cosa posa de manifest que, si bé el trànsit de l'aigua cap a la mina és ràpid, la regulació imposada pels materials que troba l'aigua en el seu pas és important.

A partir de les dades aconseguïdes per l'ACA, s'ha construït un hidrograma amb l'eix dels cabals a escala logarítmica (vegeu la figura núm. 94). En aquest hidrograma, per la forma de la corba, es pot deduir que com a mínim hi pot haver dos tipus d'aqüífers molt similars, amb una corba d'esgotament  $\alpha$  de  $7,7 \cdot 10^{-2}$ , encara que aquesta forma també pot ser deguda a anomalies en la presa de dades.



**Figura núm. 94.- Hidrograma de la reacció del cabal de l'aigua que s'introduïa a l'interior de la mina Las Salinas quan es deixava passar per la llera seca del riu un cabal d'uns 175 l/s durant uns 70 minuts**

Si es compleix que  $q = q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$ , coneixem  $q_0$  i el valor de  $\alpha$ ; llavors es pot determinar el volum d'aigua subterrània en el moment  $t_0$ , emmagatzemada per sobre del nivell de drenatge.

$$V = \int_0^{\infty} q dt = \int_0^{\infty} q_0 e^{-\alpha t} dt$$

En el nostre cas:

$$V = q_0 / \alpha$$

Resulta un volum de retenció en aquell indret que va des de l'assut de derivació del canal de l'Aranyó fins al gual dels camions, de poc menys de  $200 \text{ m}^3$ .

### 3.3.7. Assajos amb traçadors

En referència a l'arribada de la fluoresceïna a la mina, encara que l'augment del cabal ja es va detectar al cap de 30 minuts, va ser a partir de vuit hores. Al mateix temps, la temperatura que començava a arribar a la mina era inferior a la que tenia: passava de 13,7 °C a 13,0 °C. Això indica un temps de trànsit inferior al que tenia en condicions normals. Pel que fa a la conductivitat, l'aigua que arriba a la mina no experimenta cap variació, ja que continua sent pràcticament saturada.

#### *Assaig de traçador el 2004*

Durant el mes de març del 2004, juntament amb tècnics de l'empresa explotadora de la mina Las Salinas, es van realitzar intents de traçadors amb fluoresceïna sòdica, injectant diferents quantitats de traçador on el rierol que surt del forat Micó s'infiltra sota terra (vegeu les figures núm. 95 i 96). Amb mostrejadors automàtics també es van recollir diferents mostres a diferents temps, amb un resultat totalment nul.



**Figura núm. 95. Assajos amb traçadors de fluoresceïna sòdica abocats a la sortida del forat Micó, sense èxit en els controls realitzats a l'interior de la mina Las Salinas fins a 48 hores**



**Figura núm. 96. Es van col·locar mostrejadors automàtics tant a l'interior de la mina Las Salinas com a la sortida del torrent Salat**

### 3. RESULTATS HIDROGEOLÒGICS