

TREBALL FI DE CARRERA

Títol

EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES
A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A
UNA CANALITZACIÓ D'AIGUA

Autor/a

ALBA BOSCH I TEIXIDÓ

Tutor/a

LLUÍS RIVERO I MARGINEDAS

Departament

DEPARTAMENT DE GEOQUÍMICA, PETROLOGIA I PROSPECCIÓ GEOLÒGICA

Intensificació

PROSPECCIÓ GEOFÍSICA

Data

19 D'OCTUBRE DEL 2011

ÍNDEX

AGRAÏMENTS	V
RESUM.....	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDEX DE FIGURES.....	XI
ÍNDEX DE TAULES.....	XV
CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 Objectius	2
1.2 Estructura	2
CAPÍTOL 2. MÈTODES GEOFÍSICS UTILITZATS.....	3
2.1 Tomografia elèctrica o Electrical Resistivity Tomography (ERT)	5
2.1.1 Introducció	5
2.1.2 Aplicacions de la ERT	6
2.1.3 Resistivitat elèctrica dels materials.....	7
2.1.4 Principis teòrics bàsics.....	10
2.1.4.1 Concepte de resistivitat.....	10
2.1.4.2 Fonaments del mètode	13
2.1.5 Profunditat d'Investigació Vs. Resolució.....	14
2.1.6 Tipus de dispositius	16
2.1.6.1 Dispositiu Wenner	16
2.1.6.2 Dispositiu Wenner – Schlumberger.....	18
2.1.6.3 Dispositiu Dipol – Dipol	19
2.1.6.4 Dispositiu Pol – Dipol.....	19
2.1.6.5 Dispositiu Pol – Pol	20
2.2 Geo-radar o Ground Penetrating Radar (GPR).....	23

2.2.1	Introducció	23
2.2.2	Aplicacions del GPR	23
2.2.3	Principis teòrics bàsics.....	25
2.2.3.1	Lleis de Maxwell	25
2.2.3.2	Equacions constitutives.....	26
2.2.3.3	Llei de Snell.....	29
2.2.4	Característiques de la propagació de les ones electromagnètiques en medis materials.....	30
2.2.4.1	Dispersió geomètrica del front d'ones.....	32
2.2.4.2	Fenòmens d'absorció	32
2.2.4.3	Dispersió de l'energia ("scattering")	33
2.2.5	Freqüència central Vs. Profunditat Màxima de Penetració	33
2.2.6	Descripció i característiques dels equips de GPR.....	34
2.2.6.1	Unitat central	35
2.2.6.2	Antenes	35
2.2.6.3	Impressora gràfica.....	36
2.2.6.4	Roda de medició o odòmetre.....	38
2.2.6.5	GPS	38
CAPÍTOL 3. CAS PRÀCTIC : CANAL DE BALAGUER		39
3.1	Antecedents	39
3.2	Motivació.....	41
3.3	Marc geogràfic i context geològic de la zona.....	42
3.3.1	Situació geogràfica	42
3.3.2	Context geològic.....	43
3.3.2.1	Litologia i estratigrafia.....	45
3.3.2.2	Tectònica	48
3.3.2.3	Geomorfologia	48

3.3.2.4	Hidrogeologia	48
3.4	Aplicació de la Tomografia elèctrica (ERT) a l'estudi del Canal de Balaguer.....	49
3.4.1	Planificació de la campanya de reconeixement	49
3.4.2	Metodologia al camp i adquisició de les dades.....	50
3.4.3	Tractament de les dades	50
3.4.3.1	Processat	50
3.4.4	Resultats obtinguts i interpretació de les dades.....	55
3.4.4.1	Tram 1: PK 0+150 – PK 0+400	55
3.4.4.2	Tram 2: PK 0+700-PK 0+800	60
3.4.4.3	Tram 3: PK 1+700-PK 1+800	64
3.4.4.4	Tram 4: PK 1+900-PK 2+000	68
3.4.4.5	Tram 5: PK 2+500-PK 2+600	72
3.4.4.6	Tram 6: PK 2+800-PK 3+000	76
3.5	Aplicació del Geo – Radar (GPR) a l'estudi del canal de Balaguer.....	80
3.5.1	Planificació de la campanya de reconeixement	80
3.5.2	Metodologia de camp i adquisició de les dades	81
3.5.3	Tractament de les dades	84
3.5.3.1	Processat	84
3.5.4	Resultats obtinguts i interpretació de les dades.....	86
3.5.4.1	Perfils Longitudinals	86
3.5.4.2	Perfils Transversals.....	101
CAPÍTOL 4. CONCLUSIONS I RECOMANACIONS		105
4.1	Conclusions.....	105
4.2	Recomanacions	106
BIBLIOGRAFIA.....		107

ANNEX I: PLANTA DE SITUACIONS DELS PERFILS DE ERT I GPR

ANNEX II: PLANTA DE SITUACIONS DE LES ANOMALIES DE ERT I GPR

ANNEX III: RADARGRAMES

ANNEX IV: LLIBRETA DE CAMP

AGRAÏMENTS

Sembla que això ja s'ha acabat, ja som aquí, ja hi hem arribat. Uns més abans, altres més tard, però a tots ens arriba el moment, i aquest cop sembla que m'ha tocat a mi.

Sembla que sigui avui, quan no tenia massa clar si la decisió que havia pres era la correcta. Ara ja puc dir que, no només ha estat una decisió correcta sinó que ha estat la millor de totes. La que m'ha permès conèixer a magnífiques persones (elles ja saben qui són eh?)

Primer de tot voldria donar les gràcies al meu tutor, el Lluís Rivero, que tot i estar molt ocupat sempre ha trobat un moment per ajudar-me i aconsellar-me. Al Raúl, per estar sempre disponible per solucionar tots els dubtes que m'han anat sorgint amb el processat de les dades.

També voldria agrair als integrants del CDDECMA TEAM, que en són uns quants tot el suport i companyia; al Joshua, per ser un bon company de feina i fer-me riure amb el seu humor característic, a la Xerellu, la Nútria, l'Angelines, el Rotman, la Pepa i l'Andreu, per aguantar-me en els moments d'estres, que han estat molts, ser que em poso molt pesadeta amb les cançons cutres. A la Rosa, recupera't aviat que et trobem a faltar, i a la Pilar, molta sort.

Gràcies a tots els companys d'Enginyeria Geològica, en especial, a l'Isaac i com no al Ferran, per no perdre la paciència amb mi fins i tot quan jo ja ho havia fet.

Al Marc, la Sara i la petita Lucía, moltes gràcies per escoltar-me sempre que ha calgut i proporcionar-me un refugi quan no podia més.

A la Cris, simplement gràcies guapa, perquè les dos hem estat molt ocupades però sempre em trobat un moment per posar-nos al dia.

No puc oblidar-me de la meva família, dels meus pares i germans, que m'han recolzat en tot moment i m'han animat quan no tenia massa clar quin futur em depararia. Moltes gràcies, això no hauria estat possible sense vosaltres. Als meus Padrins, els que hi són i el que ja no, gràcies.

I ja per últim, el meu nen, en Ferran, el millor amic que he pogut tenir i l'amor de la meva vida. Gràcies per aparèixer en el millor moment. Gràcies per escoltar-me, comprendre'm, recolzar-me i estimar-me com ho has fet, t'estimo.

RESUM

L'objecte d'estudi d'aquesta tesina és l'aplicació d'eines de prospecció geofísica a la problemàtica associada a les canalitzacions d'aigua, com ara les filtracions d'aigua, la neteja de fins i les cavitats generades per la seva circulació.

La localització de filtracions d'aigua i de cavitats, és un tema d'especial interès en l'àmbit de l'enginyeria. Aquestes poden ser desencadenats d'errors molt greus com ara una pèrdua parcial de la funcionalitat d'una obra o, en cas que no s'adoptin les mesures correctores oportunes, un col·lapse estructural de la mateixa o de les estructures adjacents.

Les pèrdues d'aigua en conduccions hidràuliques i les conseqüents cavitats que se'n deriven són un problema a considerar, que necessita una resposta ràpida per tal d'identificar el problema i poder aplicar-hi una solució quant abans millor.

Els mètodes geofísics són tècniques "in situ" no destructives, econòmiques i de fàcil i ràpida implementació al camp. Aquestes característiques juntament amb les bones prestacions que ens ofereixen per detectar fuites d'aigua i cavitats en el subsòl, converteixen aquest tipus de mètodes en instruments vàlids per a abordar aquestes situacions.

Concretament, en aquesta tesina es presenta una campanya de prospecció geofísica emplaçada al Canal Auxiliar de Balaguer, conegut també com a canal de la central hidroelèctrica o, en alguns trams, canal auxiliar d'Urgell. Les tècniques geofísiques escollides han estat la Tomografia elèctrica, també coneguda amb el nom de ERT (Electrical Resistivity Tomography) i el Geo-Radar o GPR (Ground Penetrating Radar).

PARAULES CLAU: Prospecció geofísica, tomografia elèctrica, ERT, geo-radar, GPR, canal de Balaguer, filtracions d'aigua, cavitats.

ABSTRACT

This thesis aim is the use of geophysical prospecting methods to study water canalization related problems such as leaks or cavities generated by water circulation.

Leaks and cavities location is a very interesting issue in civil engineering. Both can unleash severe errors such as making a work place less functional, the structural work collapse of itself or the nearby structures.

Water losses in hydraulic conductions and the possible cavities generated are a problem that requires attention and a fast response to identify the leaks and be able to apply a solution.

Geophysical methods are “in situ” non-destructive and economic techniques with an easy and fast field implementation. These characteristics along with the good features offered when detecting water leaks and subsoil cavities, make geophysical methods appropriate to study this kind of situations.

Specifically, this thesis presents a geophysical prospecting campaign located in the Canal Auxiliar de Balaguer, also known as Canal de la central hidroelèctrica, or in some phases, Canal Auxiliar d’Urgell. Geophysical techniques chosen for this study are: Electrical tomography also known as ERT (Electrical Resistivity Tomography) and Geo-Radar or GPR (Ground Penetrating Radar).

KEYWORDS: Geophysical Prospecting, Electrical Resistivity Tomography, ERT, Ground Penetrating Radar, GPR, Canal de Balaguer, water losses, cavities.

ÍNDIX DE FIGURES

FIGURA 1: Escala gràfica dels valors de resistivitat de les roques, sòls i minerals (Loke, 1996-2011).....	9
FIGURA 2: Esquema bàsic dels mètodes de resistivitat	12
FIGURA 3: Heterogeneïtats del subsòl	13
FIGURA 4: Principi de penetració dels dispositius geoelectrics	14
FIGURA 5: Dispositiu Wenner i el seu factor geomètric.....	17
FIGURA 6: Exemple de la seqüència de mesura per a la construcció d'una pseudosecció de resistivitat. Modificat de Reynolds (1997).....	17
FIGURA 7: Dispositiu Wenner – Schlumberger i el seu factor geomètric	18
FIGURA 8: Dispositiu Dipol – Dipol i el seu factor geomètric	19
FIGURA 9: Dispositiu Pol – dipol directe i invers.....	20
FIGURA 10: Dispositiu Pol – Pol i el seu factor geomètric.....	20
FIGURA 11: Diagrama de refracció per a la llei d'Snell.....	29
FIGURA 12: Representació gràfica del senyal.....	37
FIGURA 13: Escala de colors dels radargrames en funció de l'amplitud del senyal, utilitzat en la zona	37
FIGURA 14: Situació geogràfica de la zona d'estudi.....	42
FIGURA 15: Context geològic de la zona d'estudi	43
FIGURA 16: Seqüència tipus reconeguda en les sèries de la Unitat Evaporítica (I.G.M.E).....	46
FIGURA 17: Seqüència tipus reconeguda en les sèries de la Unitat Carbonatada (I.G.M.E).....	47
FIGURA 18: Situació global del Tram 1 en el que s'hi ha realitzat els perfils 1 Dret i 1 Esquerre	55
FIGURA 19: Perfil 1 Dret de ERT	57

FIGURA 20: Perfil 1 Esquerre de ERT	59
FIGURA 21: Situació global del Tram 2 en el que s'hi ha realitzat els perfils 2 Dret i 2 Esquerre	60
FIGURA 22: Perfil 2 Esquerre de ERT	62
FIGURA 23: Perfil 2 Dret de ERT.	63
FIGURA 24: Situació global del Tram 3 en el que s'hi ha realitzat els perfils 3 Dret i 3 Esquerre	64
FIGURA 25: Perfil 3 Dret de ERT	66
FIGURA 26: Perfil 3 Esquerre de ERT	67
FIGURA 27: Situació global del Tram 4 en el que s'hi ha realitzat els perfils 4 Dret i 4 Esquerre	68
FIGURA 28: Perfil 4 Dret de ERT	70
FIGURA 29: Perfil 4 Esquerre de ERT	71
FIGURA 30: Situació global del Tram 5 en el que s'hi ha realitzat els perfils 5 Dret i 5 Esquerre	72
FIGURA 31: Perfil 5 Dret de ERT	74
FIGURA 32: Perfil 5 Esquerre de ERT	75
FIGURA 33: Situació global del Tram 6 en el que s'hi ha realitzat els perfils 6 Dret i 6 Esquerre	76
FIGURA 34: Perfil 6 Dret de ERT	78
FIGURA 35: Perfil 6 Esquerre de ERT	79
FIGURA 36: Mètode d'adquisició de dades, Perfils de Reflexió	82
FIGURA 37: Mètode d'adquisició de les dades, Transil·luminació	82
FIGURA 38: Mètodes d'adquisició de dades, a) Mètode CMP, b) Mètode WARR, E indica la ubicació de l'emissor i R denota la ubicació del receptor	83

FIGURA 39: a) Perfil longitudinal 7. b) Imatge en detall del perfil 7 on s'hi poden veureu les reflexions produïdes per l'existència d'armadura.....	89
FIGURA 40: Exemple de dos perfils on s'hi pot observar el paral·lelisme dels estrats inclinats del terreny natural. a) Perfil 1 b) Perfil 10. Ambdós equivalents.....	90
FIGURA 41: Perfil 16 longitudinal. Igual que en la figura anterior, s'hi percep l'estratigrafia del terreny natural.....	91
FIGURA 42: Exemple de diferents comportaments dels reflectors. Entre la línia discontinua és pot observar un nivell amb un comportament més caòtic dels reflectors.....	91
FIGURA 43: Exemple de col·lapse localitzat en el perfil longitudinal 15.....	92
FIGURA 44: Exemple de col·lapse localitzat en el perfil longitudinal 25.....	92
FIGURA 45: Exemple col·lapse localitzat en el perfil longitudinal 26.....	93
FIGURA 46: Exemple de rebot aeri produït en passar per sota d'un pont en el perfil longitudinal 21.....	93
FIGURA 47: Exemple d'una hipèrbola de difracció sense interpretar.....	94
FIGURA 48: Comportament anòmal dels reflectors. S'hi percep un canvi del tipus de fàcies.....	94
FIGURA 49: Contacte entre la llosa de formigó i el terreny natural (línia vermella discontinua)	95
FIGURA 50: Exemple del comportament dels reflectors sobre una canonada. Perfil transversal 6.....	102
FIGURA 51: Exemple del comportament dels reflectors sobre dues canonades. Perfil transversal 11.....	102
FIGURA 52: Perfil 10 transversal. Localització d'una hipèrbola de difracció i d'una zona col·lapsada (requadre en negre).....	103

FIGURA 53: Exemple del comportament del reflectors al trobar-se amb una llosa de formigó armat. Perfil transversal 18..... 103

ÍNDIX DE TAULES

TAULA 1: Mètodes geofísics, paràmetres que estudien i aplicacions. (Modificat de Reynolds (1997))	4
TAULA 2: Valors de resistivitat dels materials geològics més comuns (Reynolds, 1997)	8
TAULA 3: Profunditat d'investigació, Z_e , en funció de L , de a i de n dels diferents dispositius (Loke, 1999)	15
TAULA 4: Àmbits d'aplicació del GPR (Reynolds, 1997).....	24
TAULA 5: Constants dielèctriques i velocitats de propagació d'alguns materials geològics i creats per l'home. (Johnson, Glaccum, & Wojtasinski, 1979; McCann, Jackson, & Fenning, 1988; Morey, 1974).....	31
TAULA 6: Profunditat màxima de penetració en funció de la freqüència central de l'antena (GSSI).....	34
TAULA 7: Classificació de les antenes segons la freqüència	35
TAULA 8: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 1 Dret	56
TAULA 9: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 1 Esquerre.....	58
TAULA 10: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 2 Dret	61
TAULA 11: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 3 Dret	64
TAULA 12: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 3 Esquerre	65
TAULA 13: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 4 Dret	68
TAULA 14: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 4 Esquerre.....	69
TAULA 15: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 5 Dret	72
TAULA 16: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 5 Esquerre.....	73
TAULA 17: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 6 Dret.....	76
TAULA 18: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 6 Esquerre	77

TAULA 19: Perfils Longitudinals; Longitud, nº anomalies, PK, Profunditat i marge de cada perfil.....	100
TAULA 20: Perfils Transversals; Longitud, nº anomalies, PK, posició i profunditat de les anomalies.....	101

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

La localització de possibles filtracions d'aigua en el subsòl, així com les cavitats generades per la seva circulació és una tema d'especial interès en l'àmbit de l'enginyeria. Aquestes poden ser desencadenats d'errors molt greus com ara una pèrdua parcial de la funcionalitat d'una obra o, en cas que no s'adoptin les mesures correctores oportunes, un col·lapse estructural de la mateixa o de les estructures adjacents.

Les pèrdues d'aigua en conduccions hidràuliques i les conseqüents cavitats que se'n deriven són un problema a considerar, que necessita una resposta ràpida per tal d'identificar el problema i poder aplicar-hi una solució quant abans millor.

Els mètodes geofísics són coneguts com a tècniques "in situ" no destructives de fàcil i ràpida implementació al camp. Aquestes característiques juntament amb les bones prestacions que ens ofereixen per a detectar fuites d'aigua així com cavitats en el subsòl, generades per la circulació d'aigua, converteixen aquests tipus de mètodes en instruments vàlids per a abordar problemes d'aquests tipus.

En aquest tesina es presenta una campanya de prospecció geofísica. Aquesta està emplaçada en el Canal Auxiliar de Balaguer, conegut també com a canal de la central hidroelèctrica o en alguns trams, canal auxiliar d'Urgell. Les tècniques geofísiques escollides han estat la Tomografia elèctrica també coneguda amb el nom de ERT (Electrical Resistivity Tomography) i el Geo – Radar o GPR (Ground Penetrating Radar).

1.1 OBJECTIUS

L'objectiu d'aquesta tesina és:

Caracteritzar el subsòl en diferents trams del canal de Balaguer amb l'objectiu de determinar la localització de possibles cavitats que hi puguin existir, així com localitzar filtracions d'aigua i delimitar aquelles zones que puguin ser susceptibles de patir un rentat de fins, per tal de poder aplicar les mesures correctores adients i tenir una base de dades per posteriors campanyes de manteniment.

1.2 ESTRUCTURA

La present tesina està estructurada en tres blocs: un descriptiu, una altre pràctic i per últim les conclusions i algunes recomanacions.

En el bloc descriptiu es farà la descripció dels dos mètodes geofísics, ERT i GPR, utilitzats en la campanya de camp així com els criteris utilitzats per a la seva elecció.

En el bloc pràctic s'exposarà, la metodologia i els resultats obtinguts en la campanya de camp que s'ha dut a terme en alguns trams del Canal Auxiliar de Balaguer, situat al Nord – Est de Balaguer, en el que ja si havien detectat problemes de col·lapse en els marges del canal.

I ja per acabar, el tercer bloc i més important, les conclusions generals i algunes recomanacions. En aquest bloc s'intentarà realitzar un treball de síntesis remarcant els punts més rellevants.

CAPÍTOL 2. MÈTODES GEOFÍSICS UTILITZATS

Com ja s'ha dit en el capítol anterior, els mètodes geofísics són coneguts com a tècniques "in situ" no destructives, econòmiques i de fàcil i ràpida implementació al camp. Això juntament amb les bones prestacions que donen per a la detecció de fuites d'aigua i cavitats, generades per la circulació de fluids, ha portat a la seva elecció per realitzar la campanya de camp que s'exposa en aquesta tesina.

Els mètodes geofísics s'han de considerar com a mètodes complementaris de reconeixement, i en tot cas haurien d'anar acompanyats de prospeccions directes com ara els sondejos, per tal de poder contrastar els resultats obtinguts amb la prospecció geofísica. L'objectiu inicial d'aquesta tesina era la correlació entre els resultats obtinguts mitjançant els mètodes geofísics emprats i els resultats dels sondejos mecànics, però davant la impossibilitat de la obtenció dels sondejos, s'ha optat per afegir al capítol de les conclusions algunes recomanacions, on s'indica la necessitat de realitzar aquest sondejos mecànics.

La gran diversitat de mètodes de prospecció geofísica existent, és deguda a les diferents propietats físiques que estudien i per tant és important que en cada cas s'utilitzi la tècnica més adient.

En la següent taula s'hi poden observar les diferents tècniques utilitzades en geofísica, el paràmetre que estudien i les seves aplicacions (Reynolds J. M., 1997). Aquesta taula però, està pensada per servir com a guia, en cap cas s'ha d'emprar sense la intervenció d'un tècnic especialista.

Així doncs, tenint en compte que el que interessa detectar en els dos estudis a realitzar són fuites d'aigua (aplicació 4) i cavitats generades per la circulació de fluids (aplicació 6), és pot comprovar que els dos mètodes escollits són els més adients.

MÈTODE GEOFÍSIC	PROPIETAT FÍSICA	APLICACIONS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravimètric	Densitat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Magnètic	Susceptibilitat magnètica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sísmica de refracció	Mòdul elàstic; densitat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sísmica de reflexió	Mòdul elàstic; densitat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
ERT	Resistivitat o conductivitat	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Potencial espontani	Diferència de potencial	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

MÈTODE GEOFÍSIC	PROPIETAT FÍSICA	APLICACIONS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Polarització induïda	Carregabilitat	Orange	Orange	Green	Orange	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
EM - VLF	Conductància; Inductància	Orange	Orange	Green	Orange	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Red
EM - GPR	Conductivitat; Permittivitat	Red	Red	Orange	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green
Magneto - tel·lúric	Resistivitat	Yellow	Green	Green	Orange	Orange	Red	Red	Red	Red	Red

	Mètode Primari
	Mètode Secundari
	No és el millor o no s'ha desenvolupat prou per aquesta aplicació
	No és viable

Aplicacions

1. Exploració d'hidrocarbur
2. Estudis geològics a escala regional (més de 100 Km²)
3. Exploració de dipòsits minerals
4. Obres d'enginyeria
5. Hidrogeologia
6. Detecció de cavitats poc profundes
7. Cartografia de plomalls contaminants
8. Localització i definició d'objectes metàl·lics soterrats
9. Arqueologia
10. Medicina forense

Taula 1: Mètodes geofísics, paràmetres que estudien i aplicacions. (Modificat de Reynolds(1997))

2.1 TOMOGRAFIA ELÈCTRICA O ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY (ERT)

2.1.1 INTRODUCCIÓ

La tomografia elèctrica és una tècnica d'exploració geofísica utilitzada per l'estudi del subsòl. Aquesta consisteix en la determinació d'un paràmetre físic característic d'aquest, en una zona limitada que variarà en funció del dispositiu que s'utilitzi i del número de mesures que es realitzin (López Hidalgo, Loke, Fanton, & Cara Rubí, 2004).

En la bibliografia anglosaxona es distingeixen dos nomenclatures en funció de on es realitzen les mesures: "Electrical imaging", en cas que les mesures es realitzin en superfície o "Electrical tomography" en cas que es realitzin en l'interior de perforacions i/o sondeigs (borehole), on els elèctrodes s'introdueixen en el subsòl enlloc de desplega'ls sobre la zona d'estudi (Dahlin, 2001).

En aquesta tesina ens centrarem únicament en el primer dels casos descrit anteriorment ja que tot i que a nivell teòric no existeixen diferències significatives entre ambdues variants aquesta resulta ser la tècnica més adequada per l'estudi de problemes d'infiltració d'aigua, a més de ser la variant més econòmica i de fàcil i ràpida implementació al camp.

L'objectiu de la tomografia elèctrica és determinar la distribució real de la resistivitat del subsòl a partir dels valors de resistivitat aparent obtinguts al camp mitjançant mesures realitzades per mètodes convencionals de corrent continu. La relació entre la resistivitat aparent i la resistivitat real, és una relació complexa. Per determinar la resistivitat real del subsòl a partir dels valors de la resistivitat aparent, s'aplica la tècnica de la "inversió" (Loke & Barker, 1996b). L'objectiu d'aquesta inversió és trobar un model de distribució de resistivitats reals en el subsòl, que generi una resposta similar als valors de resistivitat aparent mesurats. Les relacions matemàtiques entre els valors de resistivitat aparent mesurats i la resistivitat veritable del subsòl s'obtenen a partir de mètodes d'elements finits o diferències finites.

El procés de generació d'un perfil de tomografia elèctrica mitjançant la tècnica d'inversió, s'inicia amb les dades de resistivitat aparent mesurades al camp, representades en forma de pseudoperfil. Tot seguit es genera un model hipotètic de resistivitats reals del subsòl i resolent el que es defineix com a "càlcul del problema directe", s'arriba al model de resistivitats aparents que es derivaria del mateix. Aquestes resistivitats aparents es comparen

amb les resistivitats aparents mesurades al camp, i es calcula l'error comés. Aquest error serveix per modificar el model hipotètic real de resistivitats reals, i es repeteix el procés anterior. D'aquesta manera, després d'un seguit d'iteracions, s'aconsegueix un model de resistivitats reals del subsòl que explica les resistivitats aparents mesurades al camp.

El resultat final d'aquest tipus d'estudi, després d'haver passat per un programa d'inversió, és una imatge distància - profunditat amb la distribució de resistivitats reals del subsòl fàcilment interpretable en termes geològics, geotècnics o ambientals.

Un factor clau d'aquesta tècnica és el número i distribució de les mesures de camp ja que d'ells depenen tant la resolució com la profunditat d'investigació.

2.1.2 APLICACIONS DE LA ERT

La seva resolució i la seva polivalència, que donen la possibilitat de treballar des de pocs metres de fondària fins a un centenar de metres, permeten que la Tomografia Elèctrica sigui aplicable a molts estudis del subsòl on interressi identificar accidents o discontinuïtats que presentin un contrast suficient en la distribució de resistivitats del medi. Entre les aplicacions d'aquesta tècnica cal destacar-ne les següents:

- Detecció i caracterització de falles determinant la seva zona de influència, direcció, cabussament i extensió en profunditat.
- Detecció de contactes entre unitats litològiques de diferent naturalesa, determinant la morfologia i localització precisa de tals discontinuïtats.
- Detecció i caracterització de cavitats i buits, com ara accidents càrstics, canalitzacions, dipòsits, zones reomplertes per argila, etc.
- Determinació d'unitats aquíferes, nivells freàtics, intrusió marina, etc.

La capacitat resolutiva de la Tomografia elèctrica ofereix enormes possibilitats d'aplicació en l'àmbit de la prospecció geològica, la geotècnia i la hidrogeologia.

Com ja s'ha explicat anteriorment, l'objectiu d'aquesta tesina es determinar la localització de possibles cavitats que puguin existir, així com localitzar filtracions d'aigua en una canalització. Els bons resultats que dona la Tomografia elèctrica ens aquest casos ha estat un fet determinant per a la seva elecció.

La Tomografia elèctrica dona bons resultats per a la detecció de fuites d'aigua, això es deu al fet que l'aigua filtrada existent en la zona d'estudi mostra una resistivitat molt menor a la corresponent al terreny sec. S'ha de vigilar ja que una anomalia de tipus conductor també pot ser indicativa d'una zona amb materials de gra fi.

Pel que fa a la detecció de cavitats, la tomografia elèctrica resulta ser el mètode més adient. Inclús es pot determinar si aquestes es troben reomplertes, i en cas d'estar-ho, determinar també de quin tipus de material es tracta:

- Quan la cova està buida, la Tomografia Elèctrica assenyala una resistència elèctrica molt alta, ja que el que omple la cavitat és aire i aquest és dielèctric. En aquest cas la Tomografia Elèctrica mostrarà una anomalia amb un fort gradient i un alt valor de resistència (més de 1200 ohm·m). S'ha de vigilar doncs amb les anomalies de tipus resistiu ja que en cas de trobar-ne una amb valors lleugerament més baixos pot indicar la presència d'un nucli rocós i no d'una cavitat.
- Quan la cova està plena d'argila (reblert de gra fi) o aigua, la resistència elèctrica és menor, ja que tant l'aigua com l'argila, són bons conductors del corrent elèctric. En aquesta situació, la Tomografia Elèctrica mostrarà una anomalia amb un fort gradient i un baix valor de resistència.

2.1.3 RESISTIVITAT ELÈCTRICA DELS MATERIALS

En el moment de la interpretació és fonamental conèixer geològicament els materials sobre els que es treballa per poder interpretar els valors de resistivitat que s'obtindran en els perfils. Existeixen infinitat de taules de valors de resistivitat en funció dels minerals i de les litologies. De fet, l'ampli rang de valors de resistivitat és un dels principals avantatges d'aquest mètode, ja que permet distingir perfectament les estructures en les que hi ha un canvi important de resistivitats.

En la següent taula, s'hi poden veure els diferents valors de resistivitat per a alguns minerals i roques. Per veure un llistat més complet consultar (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990). En la figura 1, s'hi pot observar una escala gràfica amb els diferents rangs dels valors de resistivitat en funció del material.

MATERIALS	RESISTIVITAT (OHM·M)
Sulfurs:	
Calcopirita	$1.2 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-1}$
Pirita	$2.9 \cdot 10^{-5} - 1.5$
Pirrotina	$7.5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-2}$
Galena	$3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^2$
Esfalerita	$1.5 \cdot 10^7$
Òxids:	
Hematites	$3.5 \cdot 10^{-3} - 10^7$
Limonita	$10^3 - 10^7$
Magnetita	$5 \cdot 10^{-5} - 5.7 \cdot 10^3$
Ilmenita	$10^{-3} - 5 \cdot 10$
Quars	$3 \cdot 10^2 - 10^6$
Sal de roca	$3 \cdot 10 - 10^{13}$
Antracita	$10^{-3} - 2 \cdot 10^5$
Lignit	$9 - 2 \cdot 10^2$
Granit	$3 \cdot 10^2 - 10^6$
Granit alterat	$3 \cdot 10 - 5 \cdot 10^2$
Diorita	$10^4 - 10^5$
Gabre	$10^3 - 10^6$
Basalt	$10 - 1.3 \cdot 10^7$
Esquist (calcària-mica)	$20 - 10^4$
Esquist (grafit)	$10 - 10^2$
Pissarra	$6 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^7$
Marbre	$10^2 - 2.5 \cdot 10^8$

MATERIALS	RESISTIVITAT (OHM·M)
Esquist consolidat	$20 - 2 \cdot 10^3$
Conglomerats	$2 \cdot 10^3 - 10^4$
Gres	$1 - 7.4 \cdot 10^8$
Calcària	$5 \cdot 10 - 10^7$
Dolomita	$3.5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$
Margues	$3 - 7 \cdot 10$
Argila	$1 - 10^2$
Al·luvions i sorra	$10 - 8 \cdot 10^2$
Sòl amb 40% argila	8
Sòl amb 20% argila	33
Argila molt seca	50 - 150
Guix	50 - 150
Grava seca	1400
Grava saturada	100
Quaternari	50 - 100
Cendra	4
Laterita	800 - 1500
Sòl laterític	120 - 750
Sòl arenós sec	80 - 1050
Sorra argilosa	30 - 215
Sorra i grava	30 - 225
Escorrentia de pluja	20 - 100
Aire	∞
Aigua dolça	$10 - 10^2$

Taula 2: Valors de resistivitat dels materials geològics més comuns (Reynolds J. M., 1997)

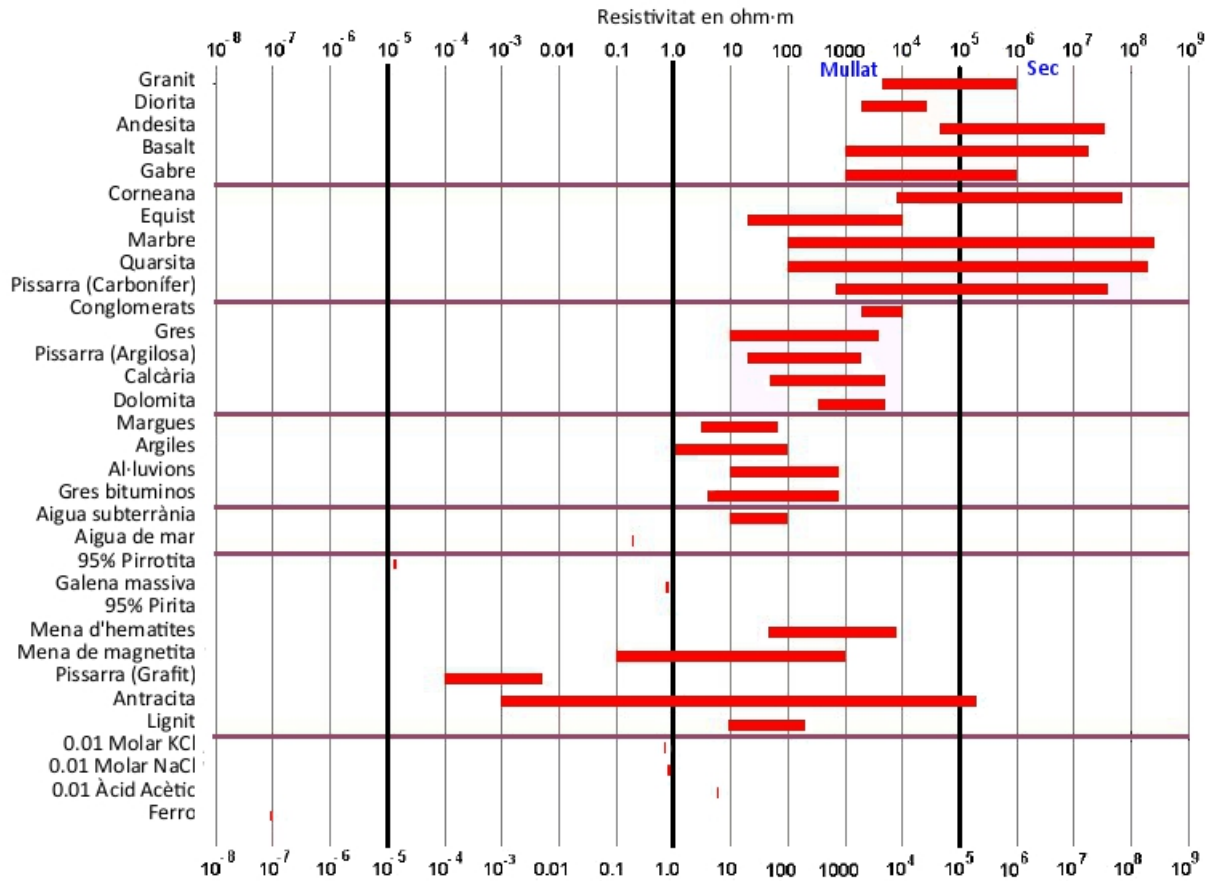


Figura 1: Escala gràfica dels valors de resistivitat de les roques, sòls i minerals (Loke, 1996-2011).

2.1.4 PRINCIPIS TEÒRICS BÀSICS

2.1.4.1 CONCEPTE DE RESISTIVITAT

Considerant un flux continu de corrent en un medi homogeni i isòtrop, on, per norma general, les propietats magnètiques es poden menysprear, les equacions de Maxwell es poden expressar com:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2)$$

On \vec{E} és el vector de camp elèctric en $\frac{V}{m}$, ϵ_0 és la permitivitat en l'espai lliure ($\epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$) i q és la densitat de càrrega en $\frac{C}{m^3}$.

Les quals indiquen que el camp elèctric és irrotacional i que es pot determinar a partir d'un potencial elèctric V .

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \cdot V \quad (3)$$

Combinant les equacions (1) i (3), s'obté l'equació fonamental de Poisson per a camps electrostàtics

$$\vec{\nabla}^2 V(x, y, z) = -\frac{1}{\epsilon_0} q(x, y, z) \quad (4)$$

Sabent que l'equació de continuïtat per a un punt en un espai 3D definit per la funció delta de Dirac és

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j}(x, y, z) = -\frac{\partial q(x, y, z, t)}{\partial t} \delta(x) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z) \quad (5)$$

On \vec{j} és el vector densitat de corrent i t és el temps. Aquesta equació juntament amb l'equació 3 i la llei d'Ohm s'obté

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (6)$$

L'equació (5) pot ser reescrita de la següent manera,

$$-\vec{\nabla}[\sigma(x, y, z) \cdot \vec{\nabla}V(x, y, z)] = \frac{\delta q(x, y, z, t)}{\delta t} \delta(x - x_f) \cdot \delta(y - y_f) \cdot \delta(z - z_f) \quad (7)$$

On x_f, y_f i z_f , defineixen la posició dels elèctrodes (punt d'origen de la càrrega). El terme origen de l'equació (7) es pot reescriure considerant el volum elemental Δv sobre una càrrega introduïda (8).

$$\frac{\delta q(x, y, z, t)}{\delta t} \delta(x - x_f) \cdot \delta(y - y_f) \cdot \delta(z - z_f) = \frac{I}{\Delta v} \delta(x - x_f) \cdot \delta(y - y_f) \cdot \delta(z - z_f) \quad (8)$$

On, I és la corrent donada pels elèctrodes, i per tant una bona aproximació de les situacions de camp reals, on habitualment s'utilitza una vara de metall per injectar la corrent al subsòl. Si es substitueix l'equació (8) en la (7) s'obté una equació diferencial en derivades parcials pel potencial elèctric en un medi en 3D, isòtrop i no uniforme generat per una càrrega puntual (9).

$$-\vec{\nabla}[\sigma(x, y, z) \cdot \vec{\nabla}V(x, y, z)] = \frac{I}{\Delta v} \delta(x - x_f) \cdot \delta(y - y_f) \cdot \delta(z - z_f) \quad (9)$$

Per a un medi homogeni i isòtrop, el camp elèctric degut a una càrrega puntual pot ser derivat analíticament. Si s'integra l'equació de continuïtat (5) sobre el volum i s'aplica el teorema de la divergència de Gauss, s'obté una integral de superfície de la densitat de corrent \vec{j} . Substituint \vec{j} de la llei d'Ohm en l'equació (6) i integrant sobre la superfície d'una esfera amb radi r s'obté

$$E(r) = \frac{I\rho}{4\pi r^2} \quad (10)$$

A partir de la qual és fàcilment demostrable que

$$V(r) = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (11)$$

Aquesta descriu el potencial degut a una càrrega puntual dintre d'un espai homogeni a una distància r del punt d'injecció de corrent. La tomografia elèctrica utilitza elèctrodes desplegats sobre la superfície. En aquest cas, l'equació (10) que s'ha integrat sobre una superfície esfèrica produeix un potencial

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (12)$$

ja que només és la meitat de l'espai.

Per a la determinació de les superfícies de resistivitats es necessita conèixer la distribució de potencial i el corrent subministrat (11). Donats dos elèctrodes de corrent A i B, com es mostra en la figura 2, i aplicant l'equació (12), el potencial per a un punt qualsevol M és

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad (13)$$

On AM és la distància entre M i A i MB és la distància entre M i B.

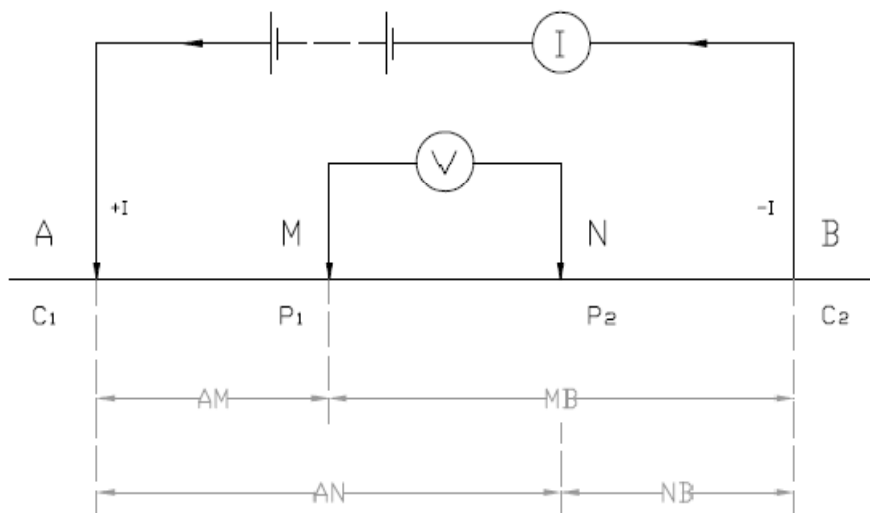


Figura 2: Esquema bàsic dels mètodes de resistivitat

Són necessaris dos elèctrodes per poder mesurar la diferència de potencial. Així doncs la diferència de potencial ΔV entre M i N.

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right] = \frac{I\rho}{K} \quad (14)$$

On AN és la distància entre N i A, NB és la distància entre N i B i K és el “factor geomètric” que depèn únicament de la distribució dels elèctrodes, és a dir, de la distància entre els 4 elèctrodes. Si es modifica l’equació (14) s’obté

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

En la realitat els terrenys sobre els quals es practiquen les campanyes de prospecció rarament són medis homogenis. Així doncs per a un sòl no homogeni, la resistivitat que s’obté d’aquesta equació és l’anomenada resistivitat aparent ρ_a .

2.1.4.2 FONAMENTS DEL MÈTODE

L’equació (15) és la base fonamental de la tomografia elèctrica, i permet obtenir d’una manera senzilla la resistivitat elèctrica ρ del subsòl.

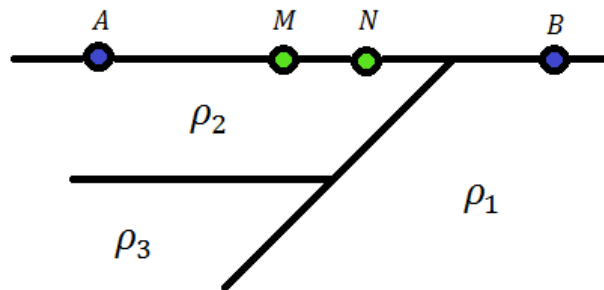


Figura 3: Heterogeneïtats del subsòl

Tal i com ja s’ha dit, si es mesura la intensitat de corrent injectada entre els elèctrodes A i B i es mesura els potencials induïts entre els elèctrodes M i N, si s’aplica la fórmula anterior (15), el resultat serà una resistivitat fictícia, coneguda amb el nom de resistivitat aparent ρ_a , que no serà igual a ρ_1 ni a ρ_2 , sino que serà una resistivitat que dependrà de ρ_1 , ρ_2 i ρ_3 .

L’expressió general de la resistivitat aparent és

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

On: ρ_a = resistivitat aparent del subsòl

K = constant que depèn de la geometria del dispositiu que s'utilitzi

ΔV = Voltatge mitjà

I = Intensitat mitjana

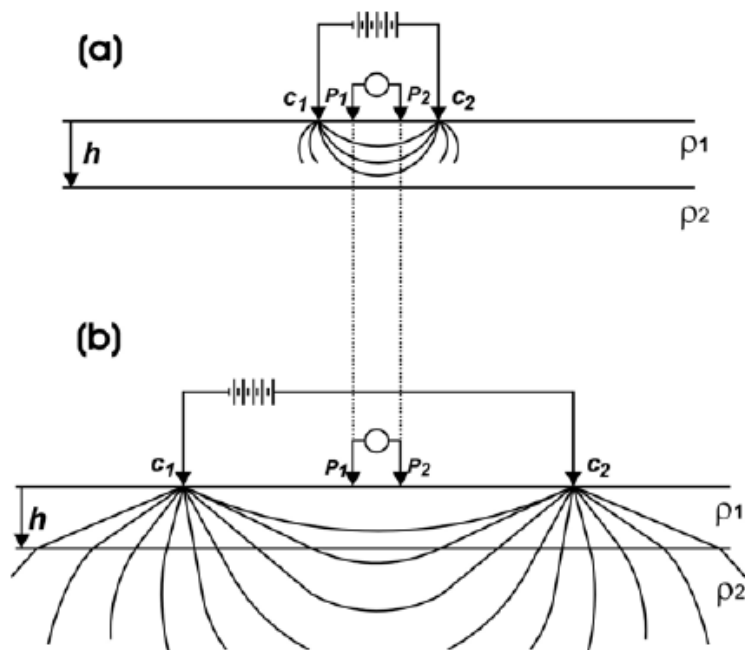


Figura 4: Principi de penetració dels dispositius geoeleèctrics

En la figura 4 s'hi pot observar un dels principis bàsics de la prospecció geoeleèctrica: a major separació entre els elèctrodes A i B, major penetració en el subsòl, tal i com s'observa en el cas b. Per contra, a menys separació entre elèctrodes (cas a) la corrent està virtualment confinada a la zona més superficial.

2.1.5 PROFUNDITAT D'INVESTIGACIÓ Vs. RESOLUCIÓ

S'han definit diferents procediments matemàtics per a determinar la profunditat d'investigació dels dispositius geoeleèctrics, basats generalment amb la funció de sensibilitat de Frechet. Aquesta funció valora el grau en el que un canvi de resistivitat del terreny provoca una variació en el potencial mesurat en els elèctrodes del dispositiu geoeleèctric.

Edwards (1977), i altres autors al llarg del temps, han publicat taules en les que s'estima la profunditat mitja d'investigació Z_e , en funció dels paràmetres geomètrics del dispositiu. En l'apartat 2.1.6 s'expliquen els diferents tipus de dispositius.

DISPOSITIU	N	$\frac{Z_e}{a}$	$\frac{Z_e}{L}$
WENNER ALPHA	-	0.519	0.173
WENNER BETA	-	0.416	0.139
WENNER GAMMA	-	0.594	0.198
WENNER - SCHLUMBERGER	1	0.52	0.173
	2	0.93	0.186
	3	1.32	0.189
	4	1.71	0.19
	5	2.09	0.19
	6	2.48	0.19
DIPOL - DIPOL	1	0.416	0.139
	2	0.697	0.174
	3	0.962	0.192
	4	1.220	0.203
	5	1.476	0.211
	6	1.730	0.216
POL - DIPOL	1	0.52	-
	2	0.93	-
	3	1.32	-
	4	1.71	-
	5	2.09	-
	6	2.48	-
POL - POL	-	0.867	-

Taula 3: Profunditat d'investigació, Z_e , en funció de L , de a i de n dels diferents dispositius (Loke, 1999)

On Z_e , és la profunditat mitja d'investigació, L la longitud del dispositiu, n el factor de separació del dispositiu Wenner – Schlumberger, Dipol – Dipol i Pol – Dipol. El valor “ a ” correspon a l'espaiat entre elèctrodes en els dispositius Wenner alfa, beta i gamma, Wenner – Schlumberger, Dipol – Dipol, i la distància entre l'elèctrode de corrent i el de potencial en el dispositiu Pol – Pol.

Cal destacar que les profunditats són estrictament vàlides per a un model homogeni de terra. Si hi ha grans contrastos de resistivitat prop de la superfície, la profunditat real de recerca podria ser diferent (Loke, 1996-2011).

S'ha de tenir en compte que si el que interessa és una profunditat d'investigació elevada, aquesta es pot aconseguir augmentant l'espaiat entre elèctrodes, s'ha d'acceptar una pèrdua de la resolució vertical, ja que al haver-hi major separació entre els elèctrodes i a que el número d'elèctrodes és limitat, els punts de la pseudosecció estaran més separats, augment en conseqüència del pas de malla.

2.1.6 TIPUS DE DISPOSITIUS

És important escollir correctament el dispositiu que s'utilitzarà per tal d'obtenir la resolució òptima i la profunditat més adient en cada cas. Per fer la selecció del dispositiu adequat, és important conèixer les propietats físiques dels objectius a localitzar i de l'àrea a estudiar, així com la sensibilitat de cada dispositiu a les diferents estructures geològiques que es puguin trobar a la zona d'estudi. També és important tenir en compte el pressupost així com el temps que es vol destinar a l'adquisició de les dades, per tal d'optimitzar la quantitat de mesures que es realitzaran amb la finalitat d'aconseguir una resolució donada.

A continuació s'enumeren els diferents dispositius existents i la seva aplicabilitat en funció de la situació existent (López Hidalgo, Loke, Fanton, & Cara Rubí, 2004).

2.1.6.1 DISPOSITIU WENNER

Aquest és un dispositiu adient quant la disposició del terreny és relativament horitzontal (canvis verticals de resistivitat). En aquest cas, aquest dispositiu té una sensibilitat considerable i per tant és recomanable. En cas contrari, és a dir, en terrenys amb estructures verticals estretes (canvis horitzontals de resistivitat), la fiabilitat del dispositiu es redueix. Aquesta disposició es pot observar en la figura 5.

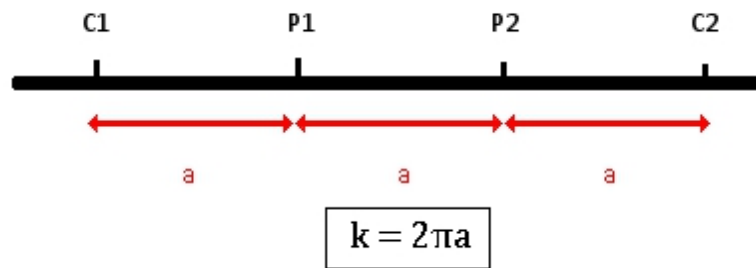


Figura 5: Dispositiu Wenner i el seu factor geomètric

La profunditat d'investigació és la meitat del espaiat, a , que és menor que en els dispositius dipol – dipol i Wenner – Schlumberger, tal i com es veurà a continuació. El factor geomètric, k , és igual a $2\pi a$, fet que aporta més fortalesa al senyal al tractar-se d'una distància menor a la dels altres dispositius. Aquest fet és avantatjós si es vol treballar amb soroll i amb informació prèvia de la zona escassa. A més a més al tractar-se d'un mètode molt ràpid, és adequat en cas de disposar de poc temps.

La distància interelectròdica, a , és igual en tots els casos i en cada nova mesura aquest valor va augmentant (figura 6). Al augmentar l'espaiat, la cobertura horitzontal disminueix, fet que pot arribar a suposar un problema. El nombre de dades que es prenen, és inferior que en el cas del dispositiu dipol – dipol i el Wenner – Schlumberger, fet que es nota en els extrems del perfil.

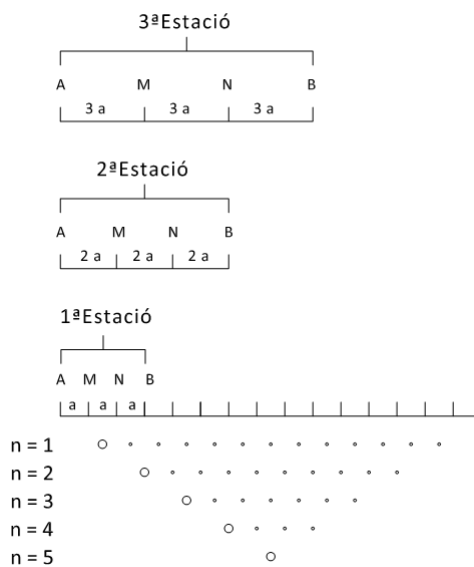


Figura 6: Exemple de la seqüència de mesura per a la construcció d'una pseudosecció de resistivitat.

Modificat de Reynolds(1997).

Per a un sistema amb 20 elèctrodes, hi ha 17 ($20 - 3$) mesures possibles amb espaiament "1a" per al tipus de dispositiu Wenner. Després de completar la primera seqüència de mesures amb l'espaiament "1a", les pròximes successions de mesures es realitzen amb espaiament elèctrodes "2a". Els primers elèctrodes 1, 3, 5 i 7 s'usen per a la primera mesura. Els elèctrodes es trien perquè l'espaiament entre els elèctrodes adjacents sigui "2a".

Per a la segona mesura, s'utilitzen els elèctrodes 2, 4, 6 i 8. Aquest procés es repeteix sobre la línia de mesurament fins que s'utilitzen els elèctrodes 14, 16, 18 i 20 per a l'última mesura amb espaiament "2a". Per a un sistema amb 20 elèctrodes, hi ha 14 ($20 - 2 \times 3$) mesures possibles amb espaiament "2a".

Aquest procés es repeteix per a mesures amb un espaiat "3a", "4a", "5a" i "6a".

2.1.6.2 DISPOSITIU WENNER – SCHLUMBERGER

Aquesta és una configuració híbrida entre els dispositius Wenner i Schlumberger (Pazdirek & Blaha, 1996). Una modificació del dispositiu Wenner mantenint un espaiat constant. En aquest cas la relació "n" fa referència a la distància entre un elèctrode de corrent, C1 o C2 i un elèctrode de potencial, P1 o P2 respectivament i la distància que hi ha entre el parell potencial P1 i P2.

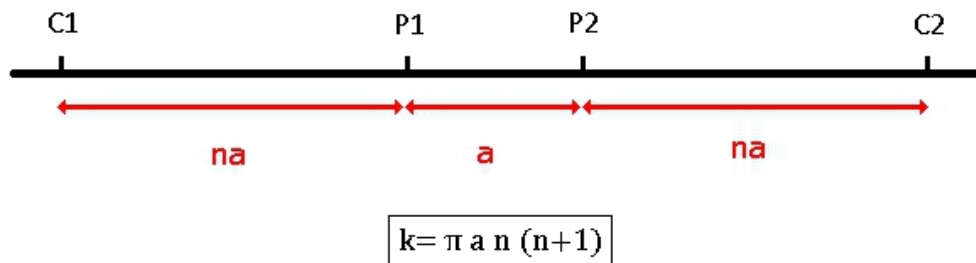


Figura 7: Dispositiu Wenner – Schlumberger i el seu factor geomètric

En la zona entre els elèctrodes de potencial (P1 – P2), la sensibilitat és lleugerament major. La distància entre els elèctrodes de potencial i de corrent és proporcional a la distància entre els elèctrodes de potencial.

Això significa que aquesta configuració és moderadament sensible a estructures horitzontals i verticals. Per tant aquest dispositiu serà usat convenientment on s'esperin zones on ambdós tipus d'estructures geològiques convisin.

La profunditat d'investigació per aquesta configuració és lleugerament major (un 10%) que en el cas del dispositiu Wenner, per a una mateixa distància entre elèctrodes, C1 i C2.

El nombre de dades que es prenen és major que en el cas Wenner però inferior que en el cas del dipol – dipol.

2.1.6.3 DISPOSITIU DIPOL – DIPOL

Es recomana el seu ús fonamentalment davant d'estructures verticals.

La profunditat d'investigació i el nombre de dades que es prenen és major que en els dos casos anteriors tal i com es pot observar en la taula 3.

Aquest dispositiu necessita instruments amb una alta sensibilitat així com un bon contacte elèctrode – terreny. En cas de trobar-se en zones amb bastant soroll ambiental, pot ser que els resultats siguin poc fiables.

El factor “a” es manté fix inicialment i el factor “n” es va augmentant per tal d'augmentar la profunditat d'investigació.

La sensibilitat és major entre els parells d'elèctrodes. Aquest és molt sensible a canvis de resistivitat horitzontal, però relativament insensible a canvis verticals, per tant, és útil en estructures verticals tals com murs enterrats, cavitats i plomes contaminants, però relativament pobre en estructures horitzontals com ara les capes sedimentàries.

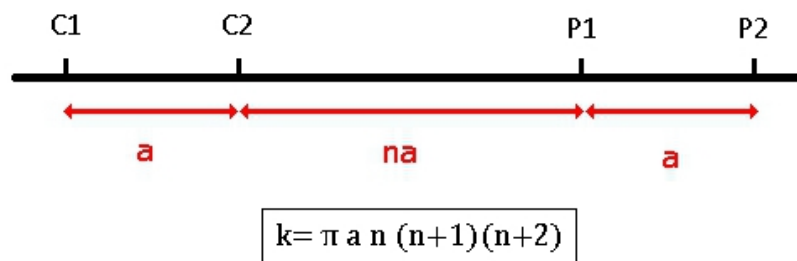


Figura 8: Dispositiu Dipol – Dipol i el seu factor geomètric

2.1.6.4 DISPOSITIU POL – DIPOL

Es tracta d'un dispositiu asimètric, fet que pot donar lloc a possibles artefactes, i per tant s'ha de vigilar al treballar amb aquest mètode. Una de les formes de solucionar aquesta adversitat és realitzar mesures amb un dispositiu igual per amb una disposició del elèctrodes inversa. Entre els elèctrodes de potencial existeix una distància “a”, entre els elèctrodes P1 i C1 hi ha una distància proporcional a “a” i l'elèctrode C2 es col·loca a l'infinit, col·locar-lo a una distància tal que la seva presència no influeixi en la mesura.

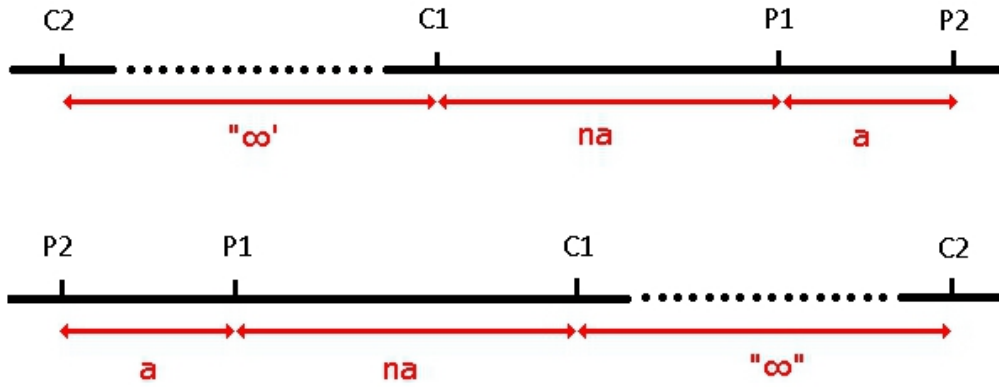


Figura 9: Dispositiu Pol – dipol directe i invers

Aquest mètode presenta un altre problema, la sensibilitat al soroll, tot i que no és tant marcada com en el cas del Pol – Pol, i per tant en zones amb molta contaminació acústica és poc recomanable.

La profunditat d'investigació es intermèdia entre les configuracions Dipol – Dipol i Pol – Pol.

Així doncs, aquest és un dispositiu adequat per detectar estructures verticals, igual que en el cas del dispositiu Dipol – Dipol, però en aquest cas el senyal té més fortalesa.

2.1.6.5 DISPOSITIU POL – POL

Aquesta configuració no s'utilitza tant com les anteriorment descrites. En la pràctica, aquest dispositiu només està format per dos elèctrodes, un de corrent (C1) i un de potencial (P1). El segon elèctrode de corrent i el de potencial s'han de disposar a una distància 20 vegades la separació màxima entre C1 i P1. Per tal de simplificar-ho és parla de posar a l'infinit els elèctrodes.

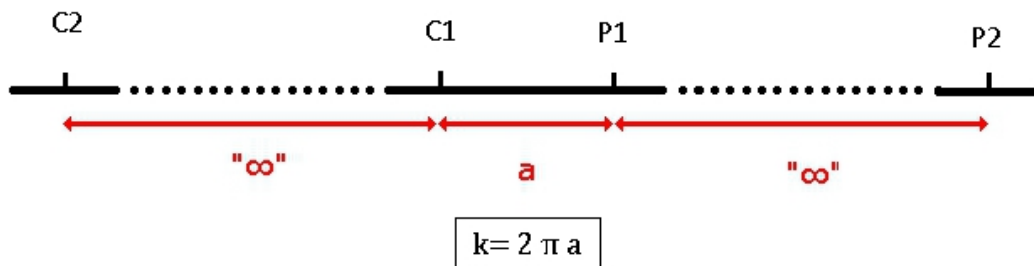


Figura 10: Dispositiu Pol – Pol i el seu factor geomètric

Aquest és el dispositiu amb una profunditat d'investigació major i tal i com passa amb la resta de dispositius, la resolució se'n veu afectada a mesura que la profunditat d'investigació augmenta i el senyal es debilita.

A més, aquest és el dispositiu més sensible al soroll i per tant s'ha de treballar en condicions adients. Aquesta configuració s'utilitza quan l'espaiat entre els elèctrodes és molt petit.

En resum:

- Utilitzar la configuració Wenner – Schlumberger en zones amb soroll i sense informació prèvia.
- Utilitzar la configuració Dipol – Dipol quan es busquen estructures verticals i la zona d'estudi no sigui massa sorollosa, amb una instrumentació sensible i procurar aconseguir un bon contacte entre el terreny – elèctrode.
- Utilitzar el dispositiu Wenner si existeixen evidències que les estructures són horitzontals i es disposa de poc temps.
- Per a un espaiat entre elèctrodes petit i una bona cobertura horitzontal es recomana utilitzar el dispositiu Pol – Pol.
- Utilitzar el dispositiu Pol – Dipol quan existeixi una estructura vertical coneguda en una zona amb poc soroll i prenen les mesures de forma normal i inversa.

2.2 GEO-RADAR O GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

2.2.1 INTRODUCCIÓ

El geo-radar (GPR) és un mètode no destructiu que es basa en l'emissió d'impulsos electromagnètics de molt curta durada (entre 1-10 ns, on 1ns són 10^{-9} s) en la banda de freqüències de UHF-VHF (habitualment entre 100 MHz i 1 GHz). Aquests impulsos són generats mitjançant una antena emissora, moment en que inicien una trajectòria a través del subsòl on poden trobar-se amb canvis de substrat així com obstacles; en definitiva el que aquests detecten es un canvi en les propietats elèctriques dels medis que travessen. Això produeix que part de l'energia es reflecteixi de nou a la superfície mentre que la resta es transmet a profunditats majors. Aquests impulsos són detectats mitjançant una antena receptora que es troba en superfície i que genera una sèrie de registres espai-temps de característiques similars als registres clàssics de sísmica de reflexió. Aquest registre mostra un perfil continu en el que s'indica el temps total de viatge de el senyal en passar a través del subsòl, reflectir-se en una heterogeneïtat, i tornar a la superfície. Aquest doble viatge (TWT – Two Way Time) es mesura en nanosegons. Al desplaçar les antenes sobre la superfície s'obté una imatge bidimensional del subsòl just a sota de la línia de desplaçament de l'antena.

Tot i ser un mètode amb molt bones prestacions també té alguna desavantatge com ara la dependència de les característiques del terreny (elevats continguts en argila i/o un grau d'humitat elevat) a on s'aplica, que atenuen la penetració del pols electromagnètic afectant a la detecció de les estructures existents.

2.2.2 APLICACIONS DEL GPR

Les aplicacions del GPR és poden dividir principalment en dos camps basant-se en la freqüència de l'antena principal, tot i que hi ha altres camps d'aplicació on no és tant habitual. El camp d'aplicació geològic, on la profunditat de penetració tendeix a ser més important que la resolució. En aquest casos s'acostumen a utilitzar freqüències menors o iguals a 500 MHz. I el camp de l'enginyeria on s'acostumen a utilitzar antenes amb freqüències des de 500 MHz fins a 900 Mhz o 1GHz. En la següent taula (4) es mostren alguns dels camps d'aplicació del GPR.

CAMP D'APLICACIÓ	
GEOLOGIA	Detecció de cavitats naturals i fissures
	Mapes de subsidència
	Cartografia de cossos arenosos
	Cartografia de dipòsits superficials
	Cartografia estratigràfica del sòl
	Recerca de la geologia glacial
	Exploració de minerals i avaluació de recursos
	Investigació permafrost
MEDI AMBIENT	Cartografia de plomalls contaminants
	Cartografia i vigilància de contaminants en les aigües subterrànies
	Localització de bosses de gas
	Investigació de les aigües subterrànies
ENGINYERIA I CONSTRUCCIÓ	Anàlisi del paviment
	Detecció de cavitats
	Ubicació de les armadures en formigó
	Localització de serveis públics (canonades, cables, etc.)
ARQUEOLOGIA	Localització d'antigues estructures enterrades
	Mapes de preexcavació
	Detecció de cavitats (criptes, etc.)
CIÈNCIA FORENSE	Localització d'objectes enterrats (cossos o lingots)

Taula 4: Àmbits d'aplicació del GPR(Reynolds J. M., 1997)

L'objectiu d'aquesta tesina és determinar la localització de possibles cavitats que puguin existir, així com localitzar filtracions d'aigua.

La detecció de cavitats en el subsòl suposa un tema de interès en molts àmbits, tal i com es pot observar en l'anterior taula. En el món de l'enginyeria i la construcció, com a estudi previ a la execució d'una obra, com a conseqüència de la pròpia obra en sí o simplement per l'efecte que causa la seva aparició en construccions ja edificades. En l'àmbit geològic, per tal de detectar aquelles cavitats naturals generades per exemple per la dissolució de nivells evaporítics, com és el cas d'aquesta tesina i en l'àmbit de l'arqueologia, per detectar antigues criptes enterrades sota el subsòl.

El geo-radar es mostra com una mètode útil en la localització d'aquest tipus de problemes, donada la seva capacitat per contrastar les propietats electromagnètiques dels sòls o roques i l'aire (habitual component de les cavitats). A més cal afegir que la profunditat habitual a la que es solen trobar les cavitats està dintre del rang d'investigació de les antenes

del geo-radar. Alguns cops les característiques del medi de propagació atenuen el senyal abans que aquest arribi a la cavitat; en aquests casos la detecció es possible no per localització directa sinó per l'efecte que aquesta produeix en el terreny que esta just immediatament per sobre d'ella.

En el cas de detecció de fuites, el geo-radar serveix com a tècnica complementària. Si no es disposa d'informació prèvia i les condicions no són òptimes (rebliments, estructures heterogènies, etc..), és molt difícil identificar la fuga d'aigua en sí mateixa, disposant únicament dels resultats del GPR. En qualsevol cas el que s'identifica és l'efecte que provoquen en els materials del subsòl.

2.2.3 PRINCIPIS TEÒRICS BÀSICS

En aquest apartat es desenvoluparan les bases teòriques sobre les quals s'assenten els fenòmens de propagació, transmissió i reflexió de les ones electromagnètiques. Per fer-ho s'utilitzen les lleis de Maxwell com a punt de partida per a la obtenció de les equacions que regeixen la propagació de les ones electromagnètiques, definint la seva dependència amb els paràmetres electromagnètics del medi de propagació. És en aquest punt on es realitza una primera classificació dels medis de propagació en funció de la seva conductivitat (dielèctrics, parcialment conductors i bons conductors) ja que aquest paràmetre limita les possibilitats de penetració de les ones a través del medi i, per tant, les possibilitats d'èxit en una prospecció realitzada amb GPR.

2.2.3.1 LLEIS DE MAXWELL

Els fenòmens electromagnètics es poden descriure a partir de les 4 equacions de Maxwell:

$$\text{Llei de Faraday} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\text{Llei de Ampere} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (18)$$

$$\text{Llei de Gauss} \quad \nabla \cdot \vec{D} = q \quad (19)$$

$$\text{Llei de Gauss} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (20)$$

On

\vec{E} = Vector d'intensitat de camp elèctric (V/m)

\vec{D} = Vector de densitat de flux elèctric (C/m²)

\vec{J} = Vector de densitat de corrent (A/m²)

\vec{H} = Vector d'intensitat de camp magnètic (A/m)

\vec{B} = Vector de densitat de flux magnètic (Wb/m²)

q = Densitat de càrrega elèctrica (C/m³)

Aquestes equacions relacionen la variació amb el temps de les magnituds del camp en un punt qualsevol de l'espai.

2.2.3.2 EQUACIONS CONSTITUTIVES

Partint de les hipòtesis en que el medi es homogeni, lineal i isòtrop, les equacions constitutives es poden expressar de la següent manera:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (21)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (22)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (23)$$

On σ, ε i μ són constants per a cada material independents dels camps, tal i com s'indica a continuació

$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ constant dielèctrica del material (F/m)

ε_r = constant dielèctrica relativa

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m, constant dielèctrica en el buit

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ permeabilitat magnètica del material (H/m)

μ_r = permeabilitat magnètica relativa

$\mu_0 = 4\pi/10^7$ H/m, permeabilitat magnètica en el buit

σ = conductivitat elèctrica del material (mho/m)

Considerant la variació del camp harmònic respecte el temps i l'absència de càrregues elèctriques lliures en la zona d'estudi, de l'aplicació de les lleis de Maxwell, es dedueix el factor γ , conegut amb el nom de constant de propagació, amb unitats de m^{-1} .

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (24)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (25)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (26)$$

On

α = Factor d'atenuació (Np/m)

β = Constant de fase (rad/m)

$\omega = 2\pi f$, Freqüència angular (rad/s)

Np = Neper, unitat adimensional com el radià i equival a 8.686 dB (Edminister, 1981).

És pot veure que en el buit es verifica $\alpha = 0$.

Suposant ones planes polaritzades horitzontalment, amb una direcció de propagació z positiva cap a l'interior del subsòl, i escollint l'eix x en la direcció del vector \vec{E} , se'n dedueix la velocitat de propagació i la longitud d'ona que s'expressen com:

Les expressions per a la velocitat v i la longitud d'ona del senyal λ s'obtenen substituint el valor de β en les equacions (25) i (26).

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad (28)$$

Substituint els valors de $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ i $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ en l'equació (27), tenint en compte que en el buit es verifica que $\alpha = 0$, $\varepsilon_r = 1$ i $\mu_r = 1$, s'obté una relació entre c , velocitat de la llum en el buit, i els paràmetres ε_0 i μ_0 , (29).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (29)$$

Fent possible l'obtenció d'una expressió de les equacions (27) i (28) en funció de c de la següent manera:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad (30)$$

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad (31)$$

Observant aquestes dues equacions es pot veure que es verifica la relació

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (32)$$

En el cas en que $\sigma \ll \omega\varepsilon$ (material dielèctric perfecte) les expressions de β , v i λ es converteixen en:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \quad (33)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (35)$$

2.2.3.3 LLEI DE SNELL

Aquesta llei afirma que el producte de l'índex de refracció per el sinus de l'angle d'incidència és constant per a qualsevol ona electromagnètica que incideixi sobre la superfície que separa dos medis. Tot i que la llei de Snell va ser formulada per explicar els fenòmens de la refracció de la llum, pot ser aplicada per a tot tipus d'ones electromagnètiques travessant una superfície que separi dos medis en els quals la velocitat de propagació de l'ona variï.

Considerant dos medis amb dos índex de refracció n_1 i n_2 , separats per una superfície S , les ones electromagnètiques que travessin els dos medis es refractaran en la superfície variant la seva direcció de propagació en funció de la diferència entre els índex de refracció dels dos medis n_1 i n_2 .

Tal i com s'observa en la figura 10, per a una ona amb un angle d'incidència θ_1 sobre el primer medi, aquesta es propagarà pel segon medi amb un angle de refracció θ_2 seguint la relació:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (36)$$

On θ_1 és l'angle entre la normal a la superfície i la direcció de propagació de la ona.

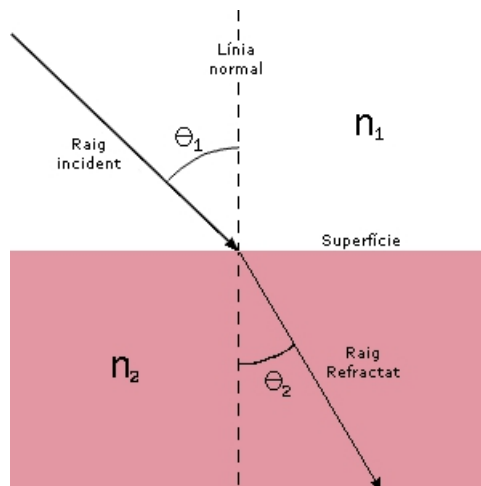


Figura 11: Diagrama de refracció per a la llei de Snell

Es pot observar que per al cas d'ones incidents de manera perpendicular a la superfície ($\theta_1 = 0$), les ones refractades sortiran amb un angle $\theta_2 = 0$ per a qualsevol n_1 i n_2 .

La simetria de la llei de Snell implica que les trajectòries de les ones són reversibles. És a dir, si una ona incideix sobre una superfície amb un angle θ_1 , i aquesta es refracta amb un angle de refracció θ_2 , llavors una ona que incideixi en la direcció oposada des de el medi 2 amb un angle θ_2 es refractarà sobre el medi 1 amb un angle de refracció θ_1 .

Així doncs, essent v_1 i v_2 les velocitats dels medis 1 i 2 respectivament, la llei de Snell es pot escriure com:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (37)$$

Pot donar-se el cas en que es produeixi el fenomen anomenat refracció total. Aquest es dona quan l'ona electromagnètica incideix amb una angle crític. En aquest cas es compleix que

$$\sin \theta_c = \frac{v_2}{v_1} \quad (38)$$

2.2.4 CARACTERÍSTIQUES DE LA PROPAGACIÓ DE LES ONES ELECTROMAGNÈTIQUES EN MEDIS MATERIALS

Els paràmetres que influeixen en la velocitat de propagació de les ones són la permitivitat dielèctrica relativa del medi, la conductivitat, la permeabilitat magnètica i la freqüència de la emissió. Els tres primers són paràmetres característics de cada medi mentre que el quart depèn de l'equip utilitzat.

En la taula 5 s'hi poden veure el valor de la constant dielèctrica i la velocitat de propagació de les ones per alguns materials geològics i fabricats per l'home. S'ha de tenir en compte que són valors orientatius.

MATERIAL		CONSTANT DIELÈCTRICA ϵ_r	VELOCITAT DE PROPAGACIÓ v (cm/ns)
Aire		1	30
Aigua	dolça	81	33
	salada	81	33
Sorra de platja	seca	10	9.5
Sorra	seca	3 - 6	12 - 17
	saturada	25 - 30	5.5 - 6
Llim	saturat	10.0	9.5
Argila	saturada	8 - 15	8.6 - 11
Sòl argilós	sec	3.0	17.3
Margues		12.0	8.6
Sòl agrícola		15.0	7.7
Sòl de pastura		13.0	8.3
Granit	sec	5.0	13.4
	humit	7	11.3
Calcària	seca	5 - 7	11
	humida	8	10
Dolomia		6.8 - 8	10.6 - 11.5
Guix (*)	no alterat	5.5	12.7
	alterat	11.9	8.7
Basalt	humit	8.0	10.6
Pissarra	humida	7.0	11.3
Gres	humit	6.0	11.2
Carbó		4 - 5	13.4 - 15
Quars		4.3	14.5
Formigó		6 - 30	5.5 - 11.2
Asfalt		3 - 5	13.4 - 17.3
PVC		3.0	17.3

Taula 5: Constants dielèctriques i velocitats de propagació d'alguns materials geològics i creats per l'home. (Johnson, Glaccum, & Wojtasinski, 1979; McCann, Jackson, & Fenning, 1988; Morey, 1974). () Dades extretes de (Holub & Dumitrscu, 1994)*

Cal tenir en compte que durant la propagació d'una ona electromagnètica per un medi es produeixen pèrdues d'energia degut a diferents causes. Aquesta disminució de l'amplitud de l'ona determina la profunditat màxima teòrica d'estudi a la que es pot arribar en cada cas. A la pràctica aquest valor encara serà menor que l'esperat ja sigui per una mala relació senyal/soroll, problemes amb els equips o per tractament de els dades incorrecte.

L'energia que finalment arriba en superfície a l'antena receptora és menor que la l'energia emesa inicialment degut a diferents causes com: la dispersió geomètrica del front d'ones, l'absorció de l'energia, la dispersió de l'energia i la refracció i reflexió en cadascuna de les interfases electromagnètiques que travessa la ona.

2.2.4.1 DISPERSIÓ GEOMÈTRICA DEL FRONT D'ONES

L'emissió de les ones del GPR es produeixen en forma de feix d'energia aproximadament cònic. La gran majoria de l'energia radiada queda compresa dintre d'una zona definida per l'angle de radiació, que en la majoria d'antenes és de 45°. Així doncs, això voldrà dir que l'antena radia amb un angle màxim de 90°. En aquest cas o en el cas de poder considerar el dipol emissor puntual, si es considera que el medi per on es propaga l'energia és homogeni i no absorbent, la reducció de l'energia és inversament proporcional a quadrat de la distància recorreguda.

2.2.4.2 FENÒMENS D'ABSORCIÓ

L'absorció es produeix quan durant la propagació de la ona part de l'energia electromagnètica es converteix en calor (Reynolds J. M., 1997). Això és conseqüència de la polarització per orientació de les molècules d'aigua, fenomen que apareix en freqüències de banda de microones i de la banda de radiofreqüències (Ulriksen, 1982). Hi ha altres tipus de polaritzacions com la iònica i la electrònica que es produeixen en altres freqüències (infrarojos i ultraviolades). No obstant en la banda de freqüències del GPR únicament es produeix la polarització per orientació. Aquest fenomen consisteix en l'orientació de la molècula de manera que la carrega positiva es desplaça respecte la negativa en la direcció del camp elèctric aplicat.

La permitivitat dielèctrica és el paràmetre que descriu la capacitat de que les càrregues oposades dintre d'un mateix material es separin una certa distància, o el que vindria a ser la capacitat de polarització d'aquest material. En general, en la majoria de materials la polarització per orientació es reduïda ja que les seves molècules no tenen suficient llibertat per orientar-se en la direcció del camp elèctric, fet que sí que ocorre amb l'aigua. Així doncs, l'existència d'aigua en la porositat d'un determinat material augmenta la capacitat de polarització del medi. Això permet afirmar que en medis on hi hagi un baix contingut d'humitat les pèrdues d'energia per polarització per orientació són menors que en medis d'humitat elevada. S'atribueix el contingut d'aigua com una de les principals causes de l'atenuació de les ones. Aquest efecte és més important en freqüències altes.

L'atenuació produïda per l'absorció d'energia del medi es deu a les característiques electromagnètiques del material per on es propaga l'ona i és la causa fonamental de les pèrdues d'energia. El factor d'atenuació (α) depèn de la permitivitat dielèctrica del medi (ϵ_r), de la conductivitat (σ), de la permeabilitat magnètica (μ) i de la pulsació de l'ona emesa (w).

$$\alpha = w \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 w^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (39)$$

On $w = 2\pi f$, i f la freqüència (Hz).

El factor de pèrdues (P) es defineix com

$$P = \frac{\sigma}{w\epsilon} = \tan D \quad (40)$$

On D és l'angle de desfasament. Els materials amb $P \ll 1$ són els denominats materials dielèctrics o quasi dielèctrics.

2.2.4.3 DISPERSIÓ DE L'ENERGIA ("SCATTERING")

Aquest fenomen es produeix quan l'energia electromagnètica incideix en objectes on les seves dimensions són del ordre de la seva longitud d'ona o inferior. En aquest cas el que es produeix és una distribució aleatòria de l'energia incident amb la conseqüència d'una disminució de l'amplitud d'ona i la generació de soroll aleatori de fons. Aquest efecte són majors en objectes on la mida de l'objecte o heterogeneïtat és de l'ordre de la longitud d'ona. En altes freqüències aquest efecte és més evident ja que les longitud d'ona són d'ordre centimètric.

2.2.5 FREQUÈNCIA CENTRAL VS. PROFUNDITAT MÀXIMA DE PENETRACIÓ

La propagació del senyal electromagnètic depèn de la freqüència del senyal transmès i de les propietats elèctriques i magnètiques dels materials del subsòl (conductivitat elèctrica, permitivitat dielèctrica i permeabilitat magnètica). La detecció d'una característica del subsòl depèn del contrast d'aquestes propietats i de la relació geomètrica amb l'antena.

La interpretació per modelar el subsòl pot variar en funció de l'equip utilitzat i de les característiques penetrants del terreny com la profunditat, orientació, mida i forma dels objectes enterrats, i la densitat i el contingut en aigua del sòl.

La següent taula pot servir com a guia en cas de disposar-se de poca o ninguna informació geològica. Cal dir que la profunditat de penetració pot variar depenent de les condicions del sòl.

FREQÜÈNCIA CENTRAL (MHz)	PROFUNDITAT MÀXIMA DE PENETRACIÓ (M)
2600	0.4
2000	0.4
1600	0.5
1000	0.6
900	1
400	4
270	6
200	9
100	15
50	25
25	40

Taula 6: Profunditat màxima de penetració en funció de la freqüència central de l'antena(GSSI)

2.2.6 DESCRIPCIÓ I CARACTERÍSTIQUES DELS EQUIPS DE GPR

En aquest aparat es descriuen el conjunt d'unitats i accessoris que constitueixen els equips de GPR.

Essencialment un geo-radar necessita una unitat central, que serveix per coordinar el funcionament de la resta de components, una sèrie d'antenes encarregades de emetre els impulsos electromagnètics i captar les seves reflexions en el subsòl i un suport per a visualitzar els resultats, ja sigui en paper (impresora) o mitjançant un monitor. Opcionalment s'hi poden afegir alguns accessoris com ara un teclat, un odòmetre o un GPS.

El GPR utilitzat en aquest estudi és el model SIR – 3000 (Subsurface Interface Radar) de la casa GSSI (Geophysical Survey System Inc.).

2.2.6.1 UNITAT CENTRAL

La seva funció és la de controlar i alimentar els sistemes electrònics de l'antena. També coordina l'emmagatzematge del senyal en algun tipus de suport (magnètic, fotogràfic, paper, etc.) i en alguns casos permet realitzar el tractament bàsic dels senyals durant l'adquisició de les dades.

Aquesta unitat sol anar connectada a un monitor per visualitzar el senyal que s'està enregistrant. Aquest es pot visualitzar de dues formes diferents, un registre de les traces d'amplitud o bé per una sèrie d'escales de colors o de grisos, on cada to engloba un interval d'amplituds de l'ona enregistrada (figures 12 i 13).

2.2.6.2 ANTENES

Les antenes són la part fonamental de l'equip de radar. La seva missió és la de generar els impulsos que són enviats cap a l'interior del terreny i tractar de detectar les reflexions que es produeixen en les discontinuïtats presents en l'interior del subsòl. En el seu interior estan presents els circuits encarregats de recompondre el conjunt de reflexions que hi hagin hagut en una sola traça mitjançant les ordres rebudes per la unitat central.

Cada tipus d'antena s'ha d'escollir adequadament d'acord amb les necessitats de la seva utilització. Les antenes es poden classificar en funció de la seva freqüència (veure taula 7)

BANDA	FREQÜÈNCIA	LONGITUD D'ONA AL BUIT	DENOMINACIÓ
ELF	< 3 kHz	>100 km	Freqüència extremadament baixa
VLF	3 - 30 kHz	100 - 10 km	Molt baixa freqüència
LF	30 - 300 kHz	10 - 1 km	Baixa freqüència
MF	0.3 - 3 MHz	1000 - 100 m	Mitja freqüència
HF	3 - 30 MHz	100 - 10 m	Alta freqüència
VHF	30 - 300 MHz	10 - 1 m	Alta freqüència
UHF	0.3 - 3 GHz	100 - 10 cm	Ultra alta freqüència
SHF	3 - 30 GHz	10 - 1 cm	Súper alta freqüència
EHF	30 - 300 GHz	10 - 1 mm	Freqüència extremadament alta

Taula 7: Classificació de les antenes segons la freqüència

El geo-radar utilitza bandes de freqüència situades aproximadament entre 10 MHz i 3 GHz, és a dir, entre les bandes VHF i UHF (corresponents a les ones de radio i les microones).

Existeix una altra classificació per a les antenes de geo-radar en funció del nombre de dipòls implementats. És distingeix entre antenes monoestàtiques i biestàtiques.

Les antenes monoestàtiques són emissores i receptors de l'energia. Se'n poden diferenciar dos tipus: antenes de commutació i antenes de dos dipòls. Les primeres tenen una única espira que pot actuar com a emissora i com a receptora d'energia. Les antenes de dos dipòls presenten, en l'interior de la carcassa dos dipòls separats. Un d'ells funciona com emissor, mentre l'altre és un receptor. La separació de les dos espires és constant i aquestes es desplacen juntes amb una única carcassa que les cobreix. Les antenes monoestàtiques permeten realitzar amb més facilitats perfils, en aquells treballs que requereixen major rapidesa, un número elevat de perfils o una estructura de malla per poder analitzar el medi.

Les antenes utilitzades en aquest treball són antenes monoestàtiques de dos dipòls, amb una freqüència de 400 MHz amb un camp d'acció de fins a 3 metres de profunditat, que com ja es veurà més endavant al final a resultat que la profunditat calculada serà de uns 2,2 metres.

2.2.6.3 IMPRESSORA GRÀFICA

Es tracta d'una impressora de capçalera tèrmica, capaç de generar imatges espai – temps a partir de la interpretació del senyal procedent de la unitat central. El seu funcionament es mostra en la figura (12). De manera que els senyals amb amplituds majors que el llindar establert per l'operador s'enregistren de color negre. El resultat és un registre (radargrama), on l'eix d'abscisses correspon al desplaçament de l'antena sobre el terreny i l'eix d'ordenades reflexa el temps que inverteix un pols electromagnètic en recorre el camí de l'antena emissora al reflector i del reflector a l'antena receptora. Un cop finalitzada la campanya de camp, i ja en el moment del processat i la interpretació dels radargrames, el programa permet assignar altres llindars d'amplitud i assignar-hi altres colors. En la figura 13 s'hi pot veure l'escala de colors assignada en els radargrames que s'interpreten en aquesta tesina.

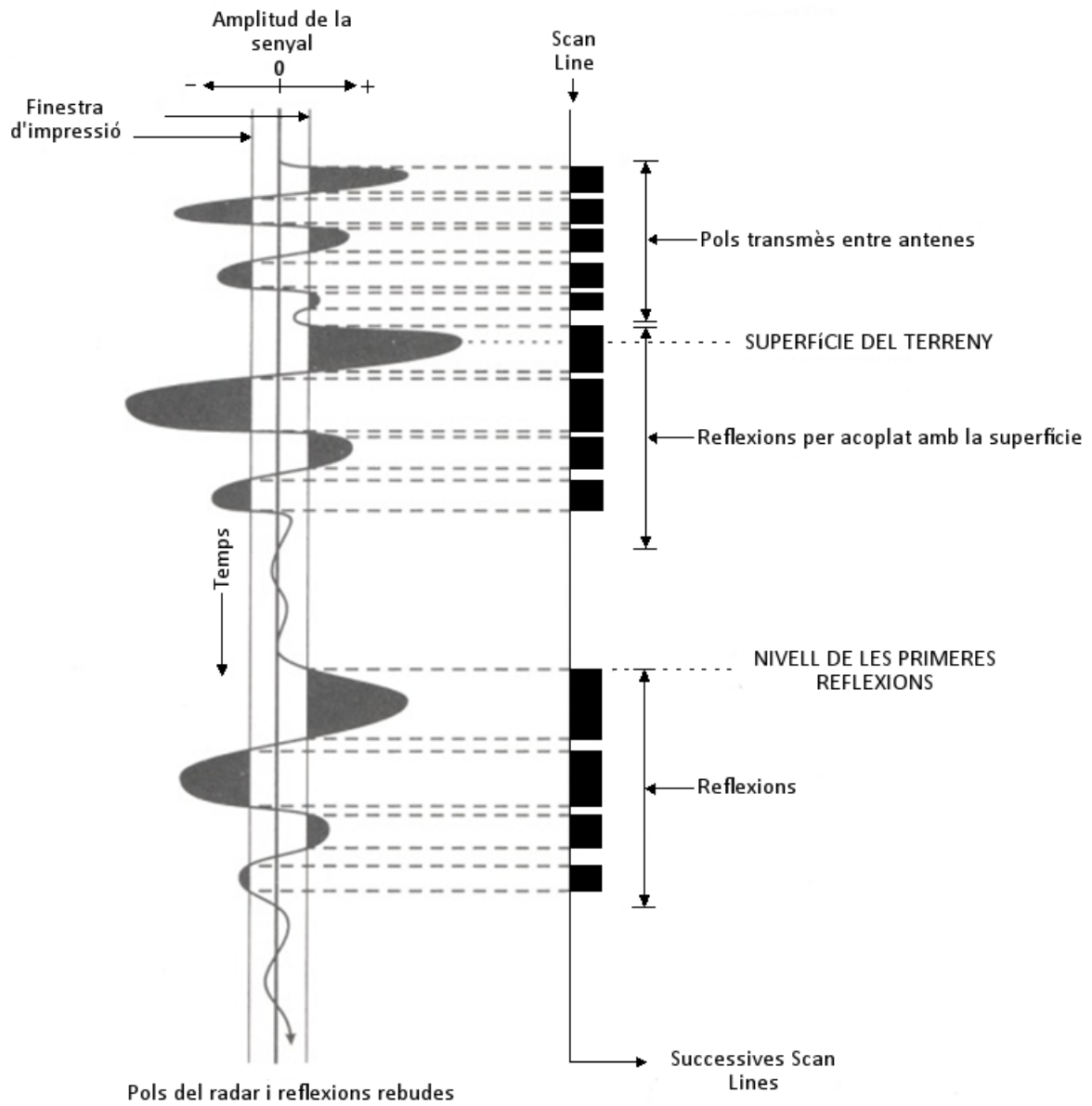


Figura 12: Representació gràfica del senyal



Figura 13: Escala de colors dels radargrames en funció de l'amplitud del senyal, utilitzat en la zona

2.2.6.4 RODA DE MEDICIÓ O ODÒMETRE

En algunes ocasions solen estar situats en un suport amb rodes sobre el que s'hi situa l'antena. Aquest sistema permet determinar la posició dels diferents punts del perfil amb una major precisió que els marcadors. Aquests permeten introduir una marca en el registre cada vegada que es pressiona un polsador. Això permet introduir marques per indicar el inici i el final del perfil i per advertir sobre algun element especial dintre del perfil.

2.2.6.5 GPS

Els equips de geo-radar d'última generació porten integrats sistemes de GPS per a la determinació de les coordenades dels perfils.

CAPÍTOL 3. CAS PRÀCTIC: CANAL DE BALAGUER

3.1 ANTECEDENTS

Regar la plana d'Urgell és una idea que data de temps immemorial.

Els àrabs construïren les sèquies dels pobles de la ribera del Segre i establiren en alguns indrets de la plana d'Urgell xarxes locals de reg derivades dels rius Corb i Cervera. Els reis Carles I i Felip II, ordenaren estudis seriosos per a la construcció d'un canal d'abast suficient per regar tota la plana. El rei Felip II ordenà al membre del Consell Reial i Tresorer del Regne, misser Martí Joan Franquesa, que fes l'estudi de la construcció d'un canal per al reg de la plana d'Urgell i dels beneficis que el mateix comportaria. A aquest succeí el lloctinent general del Regne, Don Hernando de Toledo, que l'any 1577 es reuní al castell de Bellpuig amb l'abat de Poblet per portar a terme la construcció del Canal.

Fracassades aquestes temptatives, el país intentà en el segle XVII, impulsar el projecte, acudint al Govern Municipal de Barcelona. El veí d'Anglesola, en Pere Ripoll, encapçalà l'iniciativa i redactà les dues memòries que recolzaren la petició.

En el segle XVIII abundaren les iniciatives i projectes per a la construcció del Canal. Esmentarem entre els seus promotors al comerciant barceloní en Jaume de Duran i al ministre Marqués de la Ensenada que encarregà un projecte a l'enginyer Bernardo Lana. En aquest projecte es parla per primera vegada de la construcció d'un segon Canal de "subvenció", a derivar del Segre, avall de la confluència del Noguera Pallaresa.

Esment especial mereix l' intervenció de la Junta de Comerç de Barcelona, la qual encarregà diversos projectes en aquest segle, i en el següent, per a la construcció del Canal d'Urgell. En aquesta època trobem projectes i estudis en els que intervingueren els enginyers Tomàs Desprat, Pere Llopart, Joan Cherta, Joan Soler Faneca, i el fill d'aquest, Tomàs Soler, sota la direcció del qual s' iniciaren, fins i tot, alguns treballs l'any 1817. Nous projectes i noves obres iniciades sota la direcció de l'arquitecte Antoni Sellés, foren interromputs l'any 1833.

Els anys 1847 i 1850 el Govern de l'Estat atorgà les primeres concessions per a la construcció del Canal, entre les quals cal assenyalar la del senyor Salamanca, i, posteriorment, la del senyor Ferrer Valls.

L'any 1853 la concessió es va cedir, finalment, a l'empresa Girona Germans, Clavé i Cia, la qual la traspassà, tot seguit, a la Societat Anònima Canal d'Urgell.

Acabat el termini de la concessió, el Ministeri d'Obres Públiques va instruir expedient per determinar si el Canal d'Urgell havia de revertir a l'Estat, com deia el RD de 3 de novembre de 1852, o bé als regants, tal com disposava la Llei d'aigües vigent. Per Ordre Ministerial de 10 d'agost de 1964 es resolgué, d'acord amb el dictamen del Consell d'Estat, que els regants d'Urgell havien de constituir una Comunitat General que seria titular a perpetuïtat de la concessió de l'aprofitament de les aigües i de la totalitat de les obres precises per al reg.

La concessió del Canal Auxiliar o Subcanal fou atorgada a la SA Canal d'Urgell, per al millorament dels regs, per Reial Ordre de 30 d'octubre de 1919 i transferida al Sindicat General de Regs del Canal d'Urgell, mitjançant escriptura autoritzada el dia 29 de març de 1926 pel Notari de Barcelona, senyor Leopold Rodés.

La Confederació Hidrogràfica de l'Ebre intervingué poc després de la seva creació, en l'assumpte i, per Reial Ordre de 24 de desembre de 1927 es designà una Comissió encarregada d'estudiar la manera de remeiar els problemes derivats de la insuficiència dels regs d'Urgell. Aquesta Comissió subscriuí a Saragossa una fórmula consistent en la construcció del Canal Auxiliar, que fou aprovada per Reial Decret de 25 de setembre de 1928.

El Projecte del Canal Auxiliar fou redactat per l'Enginyer de Camins, Canals i Ports, senyor Carles Valmanya Fabra, amb un pressupost de 14.667.000' pessetes, corresponent pagar als regants el 60% del cost efectiu de l'obra.

Els treballs de construcció s'iniciaren el 4 de maig de 1929 i acabaren el dia 18 de juliol de 1932.

Obres singulars dignes d'esment en el Canal Auxiliar són, la tramada de capçalera, propietat de FECSA, de 2.500 metres de llarg, el sífó del Sió i els túnels de Sidamon i els Alamús.

El Canal Auxiliar esta revestit des del seu origen fins el km. 55,60, després de l'execució de quatre projectes, el primer dels quals es porta a terme per la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre durant els anys que tingué al seu càrrec l'administració de dit Canal. Els altres tres projectes han estat executats pel Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya.

3.2 MOTIVACIÓ

El canal de Balaguer presenta des de fa uns anys alguns problemes geotècnics, tals com l'augment d'episodis d'enfonsaments superficials dels margues del canal, com a resultat de la dissolució en profunditat dels materials evaporítics, amb la consegüent mobilització de les plaques de formigó que revesteixen el canal.

Per tal de solucionar aquest problema, és van fer nombroses injeccions de ciment en aquells punts on hi havien hagut petits esfondraments i es van reforçar amb armadura algunes de les lloses que constituïen la solera del canal. Aquestes mesures però no van ser suficients, ja que tot i que en aquestes zones ja no es van presentar més problemes en la resta dels margues hi seguien havent enfonsaments.

Arribat aquest punt, és va optar per demanar els serveis al Grup Consolidat de Geologia Econòmica i Ambiental i Hidrologia del departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica de la Universitat de Barcelona per tal que fessin una campanya de prospecció geofísica amb la finalitat de determinar la localització de possibles cavitats existents, localitzar possibles filtracions d'aigua i delimitar aquelles zones on s'estigui produint un rentat de fins o pugui produir-se en un futur. L'equip especialista va optar per la utilització de les tècniques geofísiques de la Tomografia elèctrica (ERT) i el Geo-Radar (GPR).

3.3 MARC GEOGRÀFIC I CONTEXT GEOLÒGIC DE LA ZONA

3.3.1 SITUACIÓ GEOGRÀFICA

La zona d'estudi es situa en un tram del canal de Balaguer (del PK 0+000 al PK 3+000), al nord – est del municipi de Balaguer (província de Lleida).

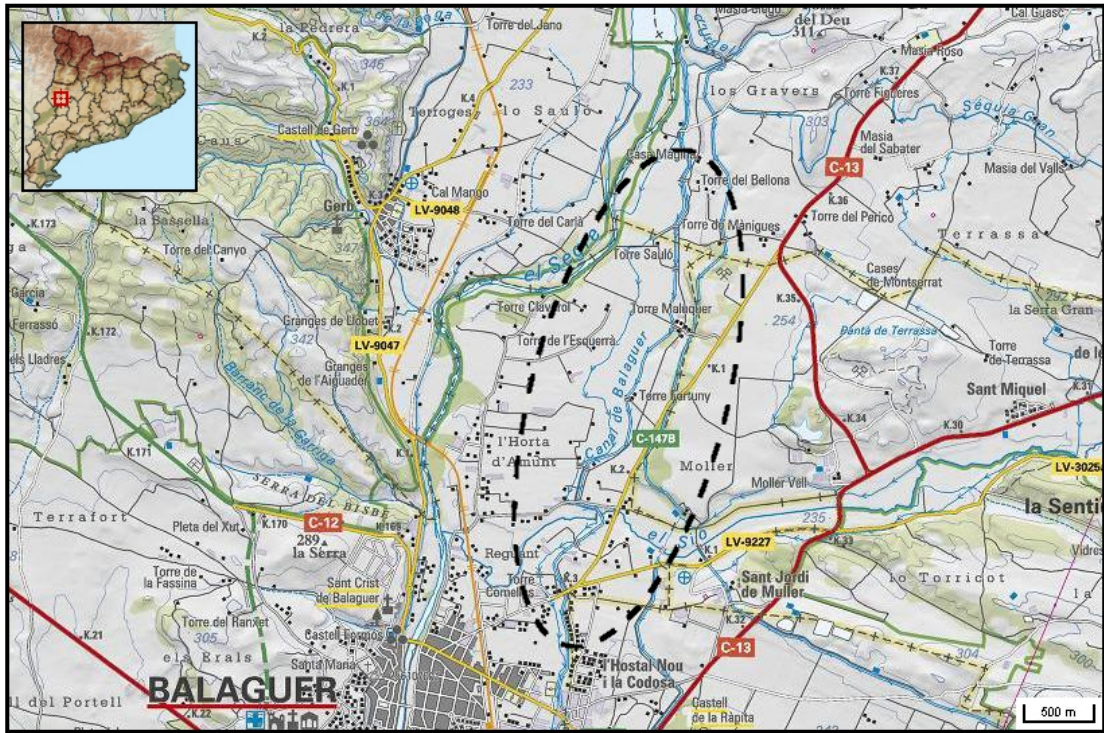


Figura 14: Situació geogràfica de la zona d'estudi

3.3.2 CONTEXT GEOLÒGIC

El terme municipal de Balaguer es troba geològicament situat en la Depressió Central Catalana, que constitueix el sector nordoriental de la gran Depressió de l' Ebre.

La topografia no presenta grans desnivells, amb cotes compreses generalment entre 200 i 350m.

Aquesta depressió, d'origen tectònic, està colmatada per sediments terciaris de l'Eocè Superior i l'Oligocè que es caracteritzen per argil·lites amb intercalacions de gresos i calcàries.

Aquest materials terciaris estan coberts parcialment per uns sediments quaternaris, que formen els glacis característics de la zona, i les terrasses al·luvials dipositades pel riu Segre.

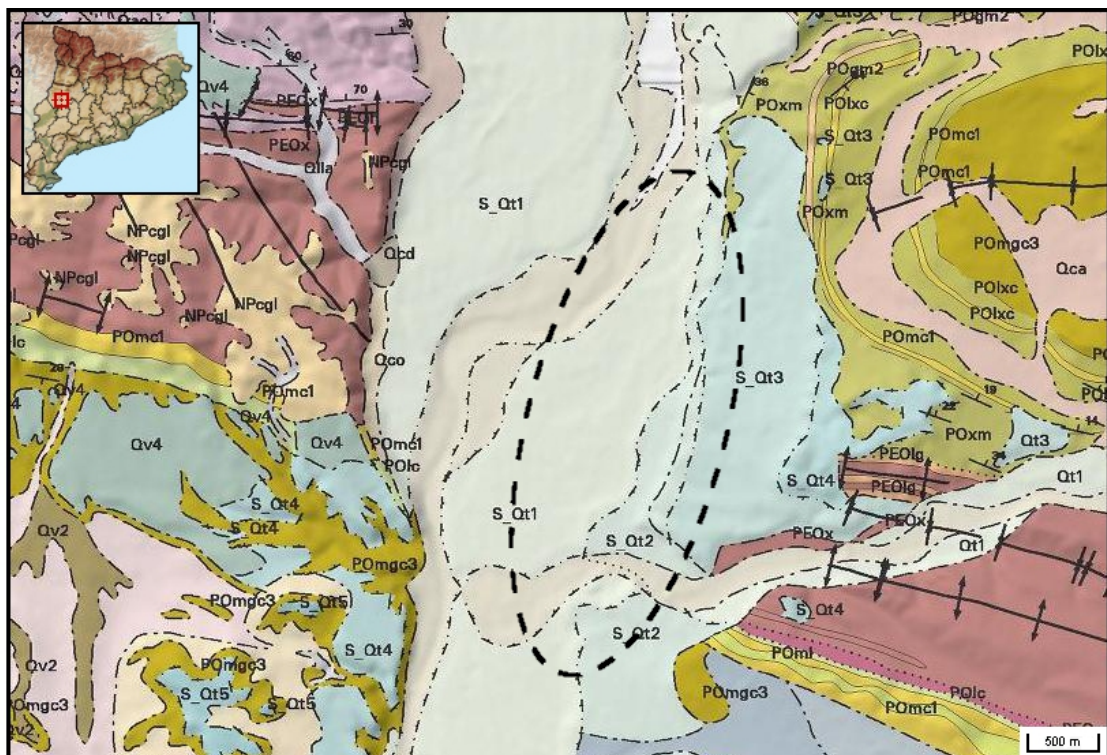


Figura 15: Context geològic de la zona d'estudi

Cenozoic

Quaternari

Holocè

Qcd	Cons de dejecció. Graves i sorres. Holocè recent.
Qlla	Sorres, graves i materials fins (llits abandonats). Holocè superior.
Qco	Dipòsits col·luvials. Argiles amb còdols angulars dispersos. Holocè.
Qt1	Terrassa fluvial. Graves, sorres i lutites. Holocè.
S_Qt1	Graves i llims. Holocè.

Plistocè

Qt3	Terrassa fluvial. Graves, sorres i lutites. Plistocè superior.
Qv2	Blocs, graves, sorres i argiles. Ventalls al·luvials correlacionables amb les terrasses fluvials Qt2. Plistocè superior.
Qv4	Graves angulars, sorres i llims. Dipòsits de ventall al·luvial antic correlacionables amb les terrasses 4 i 5. Plistocè.
S_Qt2	Terrassa del Segre i afluents. Es troba uns 20 metres sobre el nivell del riu. Holocè basal.
S_Qt3	Terrassa del Segre i afluents. Es troba uns 40 metres sobre el nivell del riu. Holocè basal.
S_Qt4	Terrassa del Segre i afluents. Es troba uns 60 m sobre el nivell del riu. Holocè basal.

S_Qt5

Terrassa del Segre i afluents. Es troba 90 m sobre el nivell del riu. Plistocè.

Neogen

Pliocè

NPcgl	Conglomerats poligènics i llims ocres. Pliocè.
-------	--

Oligocè

P Oml	Margues i calcàries amb nivells de guixos i lignits. Complex lacustre de Sanaija. Oligocè.
P Omgc3	Lutites amb intercalacions de gresos i microconglomerats. Catià.
P Olc	Argiles vermelles i margues grises amb intercalacions de gresos i calcàries. Oligocè inferior.
P Olx	Lutites grises i rosades, calcàries micrítiques, guixos blancs, margocalcàries i gresos grisos. Rupelià.
P Omc1	Calcàries micrítiques. Rupelià.

Eocè - Oligocè

PEOl	Lutites ocres i vermelloses, gresos i calcàries. Eocè superior-Oligocè inferior.
PEOx	Margues grises i gresos amb intercalacions de guixos. Eocè-Oligocè.

3.3.2.1 LITOLOGIA I ESTRATIGRAFIA

A la zona estudiada s'han diferenciat, tant per la seva naturalesa, formació i capacitat, com per la seva antiguitat i gènesis, un conjunt de sediments actuals, que pertanyen al Quaternari i un basament Terciari. A més a més en superfície es troba una capa de terra vegetal.

A continuació es presenten les característiques geològiques d'aquests materials per ordre creixent d'antiguitat:

TERRA VEGETAL

Pràcticament en tota la zona es reconeix una capa de terra vegetal. El seu gruix sembla oscil·lar entre 15 i 40 cm.

QUATERNARI

Els dipòsits quaternaris es troben molt ben representats a la zona i estan formats per diferents nivells de terrasses, als voltants dels dos rius principals i, al oest del Noguera Ribagorçana, per glacis de diferents generacions i dipòsits col·luvials, així com per dipòsits al·luvials recents.

Els sediments quaternaris es poden diferenciar en dos tipus bàsics de dipòsits:

- Terrasses i glàcis: Formats per graves rodades poligèniques amb matriu de sorres heteromètriques, localment llimoses. Es localitzen a les zones altes del terreny i cobrint els turons amb terrasses de 2 a 3 metres de gruix, i als glacis de pendent.

Localment, i generalment en superfície, poden trobar-se cimentades per carbonat càlcic formant una crosta calcària dura.

- Al·luvions i col·luvions: Argiles i llims un poc sorrencs amb nòduls de carbonat o algun nòdul rodat dispers. Apareixen en les zones baixes del relleu

TERCIARI (OLIGOCÈ)

Els dipòsits més antics del Terciari continental corresponen a la unitat Evaporítica, que està representada per la Formació Barbastro (Quirantes, 1969, publicat 1978) i aflora al nucli de l'anticlinal de Barbastro-Balaguer. Aquesta formació està datada a la part catalana com Piraboniense superior (Sáez, 1987).

Per damunt de la formació anterior es superposa la denominada Unitat Carbonata, constituïda per fàcies calcàries amb termes lutitcs-margosos intercalats, que va ser assimilada per Sáez (1987) a les Formacions "Limolites de Torà" i "Calcàries de Castelltallat", però les investigacions posteriors indiquen que és un equivalent lateral de la part més alta de les "Calcàries de Tàrraga".

Les unitats Terciàries més joves estan constituïdes per les unitats detrítiques inferior i superior, caracteritzant un episodi progradant dintre del sistema de ventalls al·luvials de procedència pirenaica. Aquestes unitats corresponen a la Formació Peraltilla i part de la Formació Sariñena (Crusafont, Riba, & Villena, 1966).

UNITAT EVAPORÍTICA. GUIXOS, ARGILES I MARGUES GRISES

Aquesta unitat correspon a la denominada "Formació Barbastro" (Quirantes, 1969, publicat 1978).

Està formada fundamentalment per guixos, entre els que a vegades s'intercalen lutites i margues de color gris-verdós.

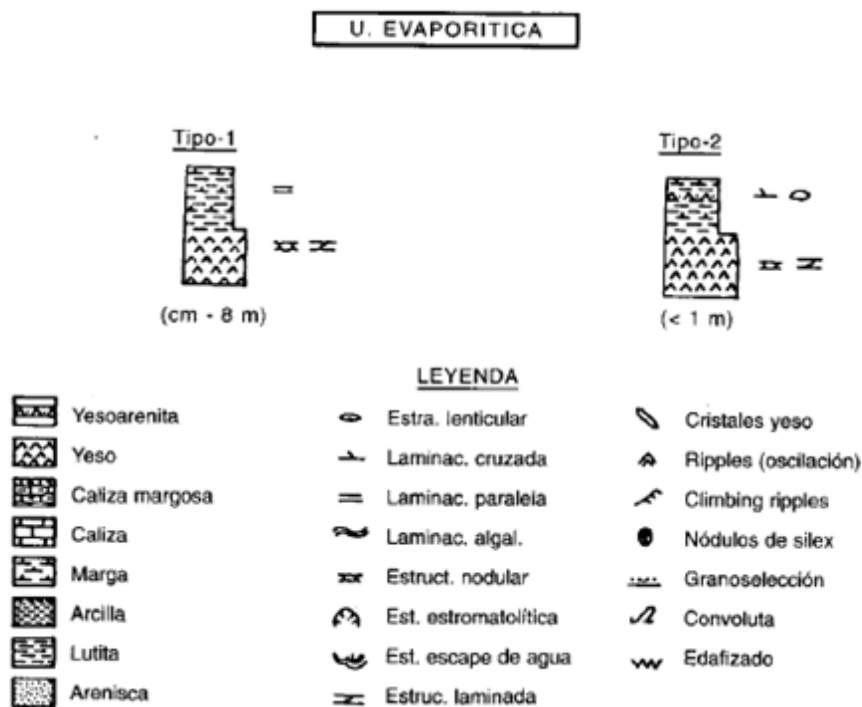


Figura 16: Seqüència tipus reconeguda en les sèries de la Unitat Evaporítica (I.G.M.E)

Al tractar-se de dipòsits afectats per el plegament i donada la seva plasticitat, es troben molt distorsionats, que juntament amb la elevada taxa de meteorització d'aquest

materials, que afecta tant a l'estructura i a la textura com a la composició, dificulta el seu reconeixement.

Els nivells de guixos presenten diverses estructures, sent més freqüents els guixos nodulars alabastrins i les megacristalins.

Els nivells intercalats entre el guixos solen correspondre a les lutites margoses amb estructura massiva i ocasionalment amb aspecte laminat.

UNITAT CARBONATADA

Aquesta unitat correspon al nivell de calcàries lacustres que es troben a la unitat evaporítica i a la Formació Peraltilla (Larragan, 1949; Garrido, 1973)

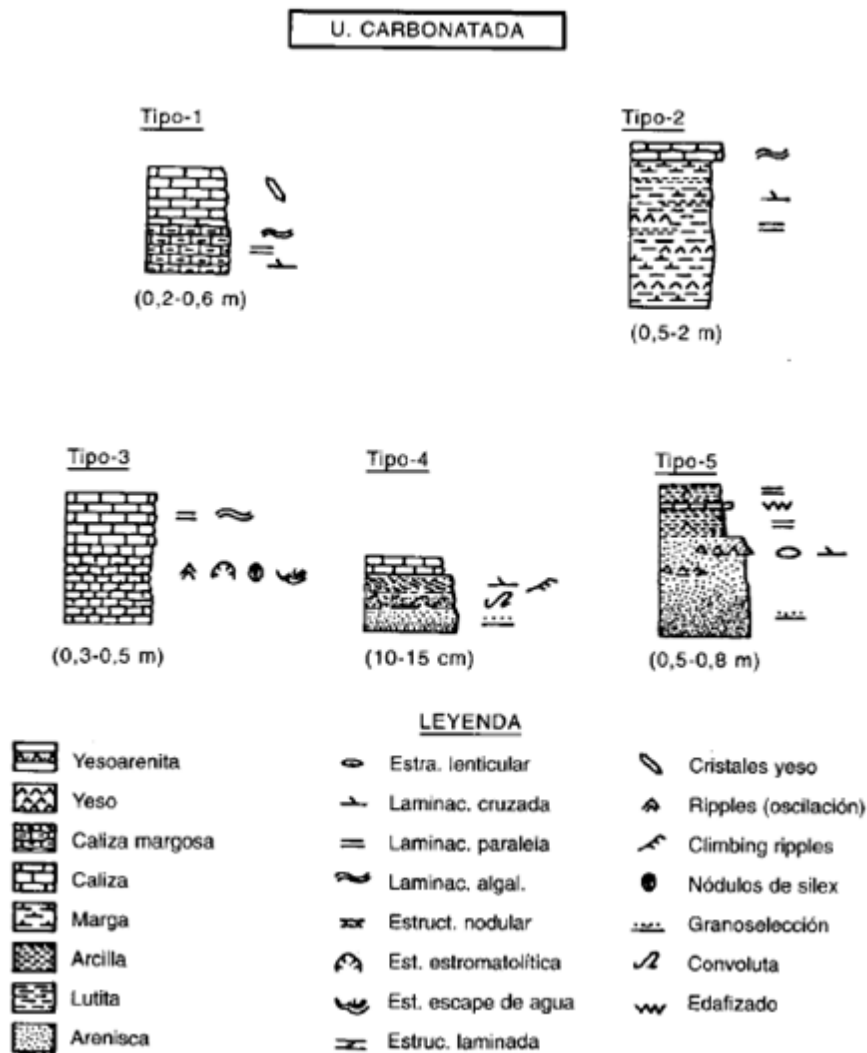


Figura 17: Seqüència tipus reconeguda en les sèries de la Unitat Carbonatada(I.G.M.E)

El basament Terciari es caracteritza per argil·lites amb intercalacions de gresos de potència molt variable.

Els gresos són de gra molt fi o mig amb ciment calcari i poden trobar-se lleugerament alterats en superfície. Les argil·lites són micàcies, de color marró, vermell i ocre i solen trobar-se un poc alterades superficialment; en profunditat compactes i dures.

Aquest sediments es presenten estructuralment subhorizontals.

3.3.2.2 TECTÒNICA

La zona estudiada ha estat sotmesa a una perllongada fase de subsidència que ha facilitat la seva colmatació amb sediments terciaris.

La manca d'esforços tectònics, durant la fase de sedimentació, ha permès que l'estructura del basament terciari sigui horitzontal o subhoritzontal amb carència d'estructures de plegament.

3.3.2.3 GEOMORFOLOGIA

Geomorfològicament és una zona de plataforma, plana en la major part de la seva extensió. La resta són vessants associades a aquesta plataforma central ja esmentada.

3.3.2.4 HIDROGEOLOGIA

El comportament hidrogeològic dels materials ve determinat per la litologia i alteració. Des del punt de vista hidrogeològic podem establir la següent classificació:

- Impermeables: Format per argil·lites i gresos impermeables del basament terciari.
- Semipermeables: Format per argiles i llims sorrencs dels al·luvions o col·luvions quaternaris que tenen una baixa permeabilitat.
- Permeables: Format per les graves i sorres de les terrasses al·luvials penjades que poden donar lloc a petites fonts de règim irregular.

3.4 APLICACIÓ DE LA TOMOGRAFIA ELÈCTRICA (ERT) A L'ESTUDI DEL CANAL DE BALAGUER.

3.4.1 PLANIFICACIÓ DE LA CAMPANYA DE RECONeixEMENT

Es important dissenyar correctament la campanya de prospecció, és a dir, escollir bé tant el número de mesures com la distribució d'aquestes ja que d'això en depèn tant la resolució com la profunditat d'investigació.

L'equip d'adquisició de dades és un resistímetre SYSCAL PRO, de l'empresa IRIS INSTRUMENTS (Orleans, França) provís d'una unitat central, 48 elèctrodes, cable RS – 232 de connexió a ordinador i cable de connexió a elèctrodes de tipus sísmic.

Els aspectes més importants que s'hauran de definir són:

- Delimitar els objectius. En aquest cas, i tal i com ja s'ha dit amb anterioritat, l'objectiu de la campanya de prospecció és caracteritzar el subsòl en diferents trams del canal de Balaguer, per tal de determinar la localització de possibles cavitats que hi puguin existir, així com localitzar filtracions d'aigua i delimitar aquelles zones que siguin més susceptibles de patir un rentat de fins o que ja l'hagin patit per tal de poder restablir la identitat del canal i tenir una base de dades per a posteriors campanyes de manteniment.
- El número de perfils a realitzar i la seva ubicació. En aquest cas s'han realitzat 18 perfils de 96 metres de longitud, distribuïts en 6 trams, on s'hi havien evidenciat més problemes de soccavament, a cadascun dels marges del canal de Balaguer. La ubicació dels perfils es pot consultar en l'Annex I.
- Profunditat màxima d'investigació. Aquesta dependrà essencialment de la longitud del perfil (a major longitud, major profunditat), a més de veure's influenciada pel tipus de dispositiu emprat. En aquest cas la profunditat màxima a la que s'arriba és d'uns 18 metres aproximadament.
- El dispositiu electròdic, número i separació dels elèctrodes. S'ha escollit un dispositiu Wenner – Schlumberger recíproc de 48 elèctrodes i una separació entre ells de 2m.

3.4.2 METODOLOGIA AL CAMP I ADQUISICIÓ DE LES DADES

En primer lloc es col·loquen els elèctrodes a la superfície de manera equiespaiada, intentant sempre que formin una línia recta. És important definir quin és l'origen i el final del perfil, per tal de no tenir problemes en la interpretació dels resultats. S'ha de procurar que la superfície en la que es realitzen els perfils sigui el més plana possible per tal d'evitar anomalies no reals. En cas que això no es pugui evitar, el software permet minimitzar aquest fenomen mitjançant un ajust de la malla.

Els elèctrodes s'han de clavar al subsòl a una profunditat suficient que garanteixi un bon contacte elèctrode – sòl. Un cop col·locats tots els elèctrodes, aquests es connectaran mitjançant uns connectors al cable.

Un cop connectats tots els elèctrodes es procedeix a la configuració de totes les variables del dispositiu: número d'elèctrodes utilitzats, distància de separació entre cadascun, dispositiu electròdic escollit i número de mesures que es volen realitzar. Un cop finalitzada la configuració, aquesta es transferida a la unitat central per tal que pugui realitzar les mesures de manera automàtica.

Prèviament al inici de les mesures es procedeix a la verificació de les connexions, comprovant si la resistivitat elèctrode – sòl és prou baixa per garantir un bons resultats. En cas que alguna de les connexions fallés és suficient en clavar una mica més l'elèctrode i si fos necessari humitejar el terreny per millorar la conductivitat.

Un cop comprovades les connexions ja es pot iniciar la seqüència de mesura predeterminada. Actualment aquest procés tarda uns 9 minuts ja que treballa en 9 canals.

Finalitzat el procés de presa de dades es bolca tota la informació a l'ordinador i es processa amb el programa corresponent.

3.4.3 TRACTAMENT DE LES DADES

3.4.3.1 PROCESSAT

L'objectiu d'aquesta tesina consisteix principalment en la comparació i realització de diferents models en 2D de resistivitats reals a partir de la pseudosecció de resistivitats

aparents obtingudes al camp. Per poder fer-ho és necessari l'ús d'un programa d'inversió, en aquest cas el programa utilitzat és el Res2DINV.

Abans de tot s'ha fet un processat de les dades obtingudes a camp mitjançant el programa PROSYSII amb la finalitat de fer un filtratge de les mateixes. Un cop filtrades les dades ja és pot procedir a la inversió de les mateixes per tal d'obtenir els perfils amb les resistivitats reals de subsòl. Tal i com ja s'ha comentat, el programa utilitzat per fer la inversió de les dades és el RES2DINV.

PROSYSII: PROCESSAT INICIAL DE LES DADES.

Al prendre les dades, es poden obtenir un sèrie de valors incoherents, com ara valors de resistivitat aparent negativa i altres valors anòmals, que són deguts a errades en el camp, ja sigui per a una mala col·locació del dispositiu o bé per sorolls del terreny que fan que el senyal es vegi alterat. Aquest és el motiu pel qual abans de treballar amb les mesures obtingudes al camp, és necessari eliminar totes aquestes anomalies del registre.

En aquest procés s'ha de tenir especial cura en no confondre anomalies degudes a factors externs, amb aquelles anomalies generades per petits cossos amb valors de resistivitat diferents que poden haver-hi en el terreny i que, en aquest cas, són l'objecte d'interès.

Inicialment de cada perfil es tenen aproximadament 1000 dades de resistivitat aparent, ja que al realitzar les mesures es va fer amb l'opció *Gapfiller* activada. Aquesta opció mesura punts addicionals, que en aquest cas no ens interessen, ja que no aporten informació, però que la seva implementació redueix substancialment el temps de mesura al camp. Així doncs, el primer que s'ha de fer, és eliminar aquests punts addicionals sense informació. Per fer-ho s'ha utilitzat l'opció *reject gapfiller*.

Un cop eliminats aquests punts, un altre valor a controlar es la desviació estàndard de les mesures. Valors superiors a 0.5 comencen a no ser admissibles. Seria molt fàcil, filtrar les mesures eliminant aquells valors amb desviació estàndard superior a aquest valor, però es podrien eliminar valors dels extrems i perdre informació.

Així doncs, al finalitzar aquest procés inicial de filtratge, dels quasi 1000 valors de resistivitat aparent, s'ha passat a uns 500 valors bons.

Per acabar només queda exportar aquestes dades pel programa d'inversió Res2DINV, en format .dat.

RES2DINV: PROCÉS D'INVERSIÓ

INTRODUCCIÓ

Els valors de resistivitat que s'obtenen al camp són valors de resistivitat aparent, és per això que serà necessari realitzar la inversió de les dades per tal d'obtenir una secció de resistivitats reals respecte a una profunditat real. Per realitzar aquesta inversió és necessari implementar algun tipus de programa que treballi amb una rutina d'inversió.

Les tècniques d'inversió que existeixen actualment es poden classificar en 2 grans grups (Olayinka, 2000):

- Block Inversion method
- Smoothness – constrained inversion method

Apart de les qüestions d'implementació i de funcionament intern, l'aspecte diferenciador més significatiu entre aquestes dues tècniques, resideix en el tipus de problemes en el que cada una d'aquestes tècniques és més eficient.

El "*Block inversion method*" ofereix bons resultats per a aquelles situacions en les que el terreny presenta grans contrastos de resistivitats.

Per tant, aquesta característica, la converteix en un tècnica ideal per a delimitar amb bastant precisió la geometria de cossos amb resistivitats molt diferenciades entre sí, com ara localitzar una canonada en un terreny bastant homogeni així com una cavitat. El principal inconvenient resideix en la necessitat d'introduir un model previ, a partir del qual l'ordinador procedirà a iterar fins a ajustar-se al model calculat al camp.

Per contra, donat que en problemes de filtracions d'aigua en el subsòl, les variacions de resistivitat del terreny seran graduals, sobretot si es tracta de sòls, aquesta tècnica no és eficient.

El "*Smoothness – constrained inversion method*" (deGroot-Hedlin & Constable, 1990), és la tècnica d'inversió més adient per al anàlisi de problemes on hi hagin variacions graduals de resistivitat en el terreny, com ara les filtracions d'aigua o l'abocament de contaminants. A més aquesta tècnica, basada en el "*Gauss – Newton least – squares method*", no requereix un model inicial a partir del qual comença el procés iteratiu.

Donat l'elevat cost computacional, juntament amb la poca capacitat dels ordinadors de la època, es va desenvolupar el mètode "*Quasi – Newton least – square*" (Loke & Barker,

1996b), que és aproximadament unes 10 vegades més ràpid que el mètode convencional. Això si, aquest mètode demana que la variació dels valors de resistivitat sigui més suau, per tal d'obtenir uns bons resultats.

En aquesta tesina, s'utilitzarà el programa Res2DINV versió 3.59.

Res2DINV és un programa que determina de forma automàtica models en 2D de resistivitat reals del terreny a partir de les dades de resistivitat aparent obtingudes al camp (Griffiths & Barker, 1993). Per al càlcul de la resistivitat aparent utilitza una subrutina de modelització "hacia adelante" i per a la rutina d'inversió utilitza la tècnica d'optimització no lineal de mínims quadrats (deGroot-Hedlin & Constable, 1990; Loke & Barker, 1996b).

El programa és compatible amb les tècniques de modelització de diferències finites i elements finits. Aquest permet ser utilitzat amb les configuracions electròdiques Wenner, pol – pol, dipol – dipol, pol – dipol, Wenner – Schlumberger i equatorial dipol – dipol (rectangular).

MARC TEÒRIC

El marc teòric que s'explica a continuació s'ha extret del manual de Res2DINV ver.3.59. (Software)

La rutina d'inversió que utilitza el programa està basada en *smoothness – constrained Least – squares method* (deGroot-Hedlin & Constable, 1990; Sasaki, 1992). Les equacions fonamentals d'aquest mètode són les següents:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (41)$$

On

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

f_x = filtre de suavitzat horitzontal

f_z = filtre de suavitzat vertical

J = matriu en derivades parcials

u = factor d'amortiment

d = vector de pertorbació del model

g = vector de discrepància

Un dels avantatges d'aquest mètode és que el factor d'amortiment i els filtres de suavitzat poden ser ajustats per adaptar-se a diferents tipus de dades. A les notes de Loke(1996-2011) s'hi pot trobar una descripció detallada de les variacions del mètode *smoothness – constrained Least – squares*.

Aquest programa és compatible amb una nova implementació del mètode de mínims quadrats basat en la tècnica d'optimització Quasi – Newtoniana(Loke & Barker, 1996b). Aquesta tècnica és bastant més ràpida que el mètode convencional de mínims quadrats per a grans conjunts de dades i requereix menys memòria. Tot i això, si és vol, el programa permet treballar utilitzant el mètode de Gauss – Newton convencional, que recalcula la matriu Jacobiana de les derivades parcials en cada iteració que tot i ser més pesat i més lent, en àrees amb grans contrastos de resistivitat, més de 10:1, ofereix uns resultats lleugerament millors. Una tercera opció és utilitzar el mètode de Gauss – Newton per la primera, segona o tercera iteració, i posteriorment aplicar el mètode de Quasi – Newtonià. Segons Loke i Dahlin(2002) en molts casos aquesta és la millor opció.

El programa d'inversió divideix el subsòl en petits prismes rectangulars amb la mateixa mida que la distància entre elèctrodes i tracta de determinar els valors de resistivitat dels prismes, amb la finalitat de minimitzar la diferència entre resistivitats aparent observada i calculada. Segons el mètode que s'utilitzi, es poden subdividir els prismes per obtenir una major resolució. És important saber que la precisió amb la que es realitza aquest càlcul decreix ràpidament amb la profunditat i per tant subdividir els prismes només és efectiu en les 2 primeres capes.

El mètode d'optimització té com a finalitat reduir la diferència entre la resistivitat aparent mesurada i calculada ajustant la resistivitat dels blocs del model. La mitjana d'aquesta diferència ve donada per l'error RMS (*root – mean – squared*). Tot i així, un model amb un error RMS mínim pot donar una variació de resistivitats poc realista i per tant pot no ser sempre el millor model des del punt de vista geològic. Per norma general, l'aproximació més prudent és escollir el model de la iteració en la que l'error RMS varia poc, això normalment succeeix entre la tercera i la cinquena iteració.

3.4.4 RESULTATS OBTINGUTS I INTERPRETACIÓ DE LES DADES

Per tal que la zona d'estudi quedi adequadament coberta, en cada tram es realitzaran perfils a banda i banda del canal, arribant, en alguns casos ha fer-ne tres a cada marge. Per tal que aquests siguin fàcilment identificables, es representaran a l'Annex I amb una D i una E en funció de si es troben en el marge dret o en el marge esquerre.

3.4.4.1 TRAM 1: PK 0+150 – PK 0+400

Per poder cobrir aquest tram s'han realitzat tres perfils de 94 m a cada marge del canal. Per tal d'unir els tres perfils s'ha utilitzat la opció *concatenate* del programa Res2DINV. Els nous perfils reben el nom de Perfil 1 Dret i Perfil 1 Esquerre, però en realitat aquests són la unió de 3 perfils.

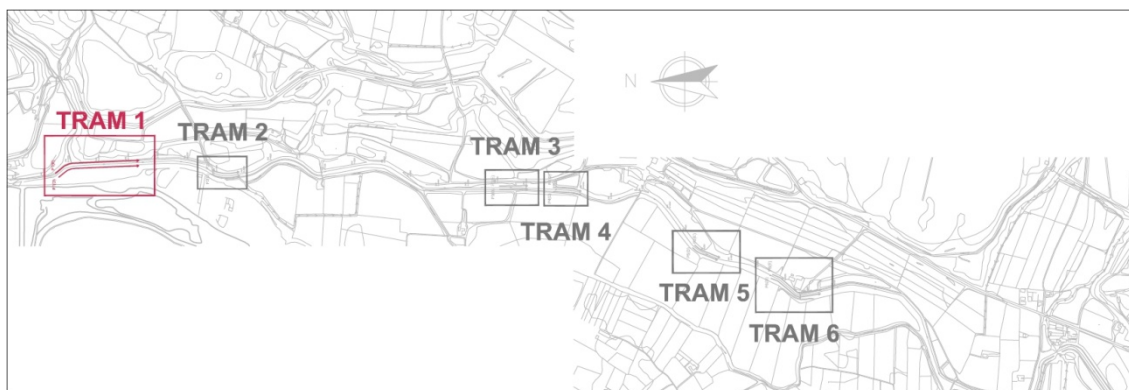


Figura 18: Situació global del Tram 1 en el que s'hi ha realitzat els perfils 1 Dret i 1 Esquerre

PERFIL 1 DRET

Aquest perfil té 282 metres de longitud i està caracteritzat per uns valors de resistivitat mitjana de entre 70 i 150 ohm·m (colors verds), valors que fan pensar que podria tractar-se del nivell de guixos amb intercalacions de lutites i margues existents en la unitat evaporítica. Aquest valors mitjans es veuen interromputs per valors de resistivitat més elevats, al voltant dels 400 ohm·m (colors ocres i grocs), inclús en un punt arriben a superar els 1800 ohm·m, i valors mínims de fins a 10 ohm·m (colors blaus)

En aquest perfil (figura 19) s'hi poden definir 5 anomalies de resistivitat (taula 8), tres de les quals són anomalies resistives (valors alts de resistivitat) i les altres dues conductives (valors baixos de resistivitat).

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 1 DRET	34	4.8	Resistiva
	123	8.6	Resistiva
	242	8.6	Resistiva
	244	3	Conductiva
	252	4.8	Conductiva

Taula 8: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 1 Dret

Les anomalies resistives poden estar provocades per la presència de cavitats existents en el subsòl o bé per la presència de nuclis rocosos. En aquest cas les anomalies situades a 34metres i a 123 metres és més probable que es tractin de nuclis rocosos, ja que els valors de resistivitat giren entorn dels 780 ohm·m (colors ocres i taronges). En canvi l'anomalia situada a 242 metres des del inici del perfil possiblement es tracti d'una cavitat, ja que els valors de resistivitat superen els 1200 ohm·m (colors liles).

Degut a la geologia de la zona, és probable que aquestes cavitats hagin estat causades per la dissolució dels guixos presents en la zona d'estudi (Unitat evaporítica de guixos, argiles i margues grises). Per poder-ho corroborar seria necessari la realització de sondejos amb extracció de mostra.

A 244 i a 252 metres des del inici del perfil s'han detectat dues anomalies de caràcter conductor, és a dir, valors baixos de resistivitat (colors blaus). Les anomalies de caràcter conductiu són indicatives de possibles filtracions d'aigua i/o de zones amb material de gra fi (com ara les argiles) i per tant material susceptible de patir un rentat de fins.

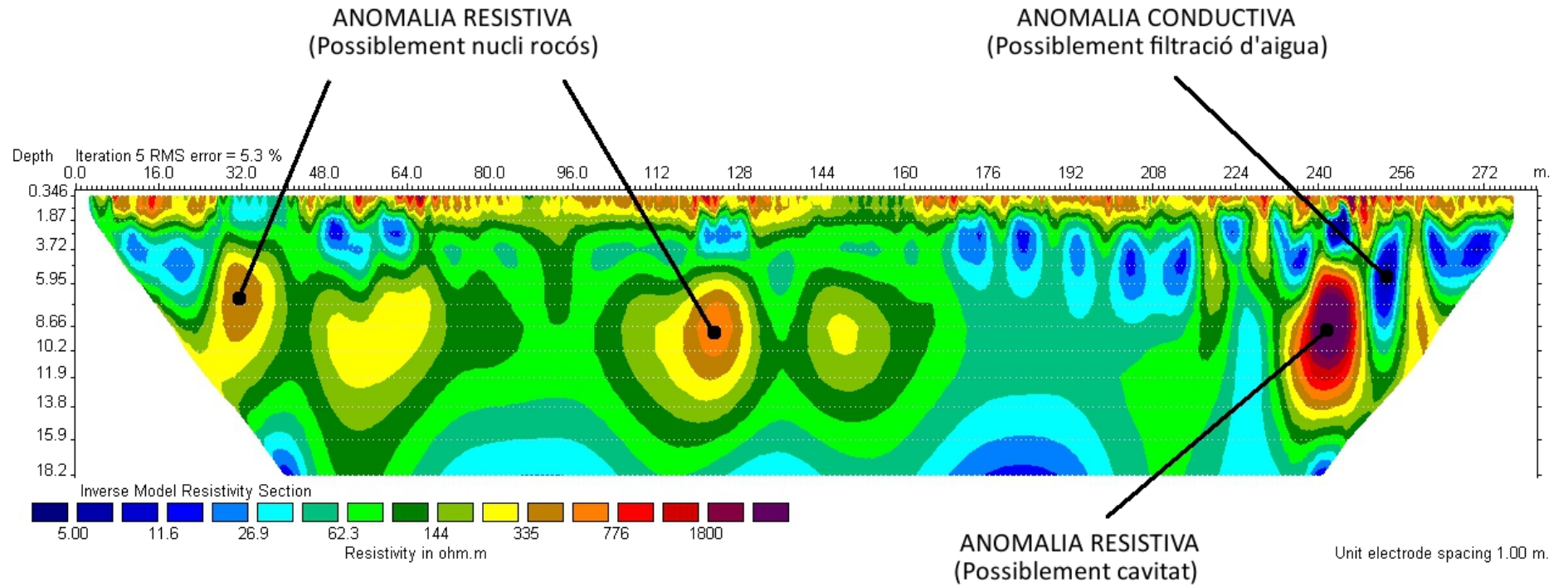


Figura 19: Perfil 1 Dret de ERT

PERFIL 1 ESQUERRE

El perfil 1 (E) té una longitud, igual que el perfil 1 (D), de 282 metres i és molt similar al perfil anterior. En aquest cas s'hi poden detectar dues anomalies, una de resistiva i una de conductiva, a més d'un canvi lateral bruscat de valors de resistivitat.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 1 ESQUERRE	36	6	Conductiva
	236	10.5	Resistiva
	125		Canvi bruscat de resistivitats

Taula 9: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 1 Esquerre

La anomalia conductiva, situada a 36 metres des del inici del perfil, possiblement correspongui a la presència d'una canonada, ja que en el moment de realitzar l'estudi es va observar la traça de la canonada i la anomalia correspon amb la seva posició.

La anomalia resistiva, que presenta uns valors aproximats de 500 ohm·m (color groc i ocre), possiblement es tracti d'un nucli rocós ja que per tractar-se d'una cavitat els valors de resistivitat haurien de superar els 1200 ohm·m.

A 125 metres des del inici del perfil s'ha detectat un canvi bruscat dels valors de resistivitat, aquest pot tractar-se d'un canvi lateral de fàcies o bé de la presència d'una falla.

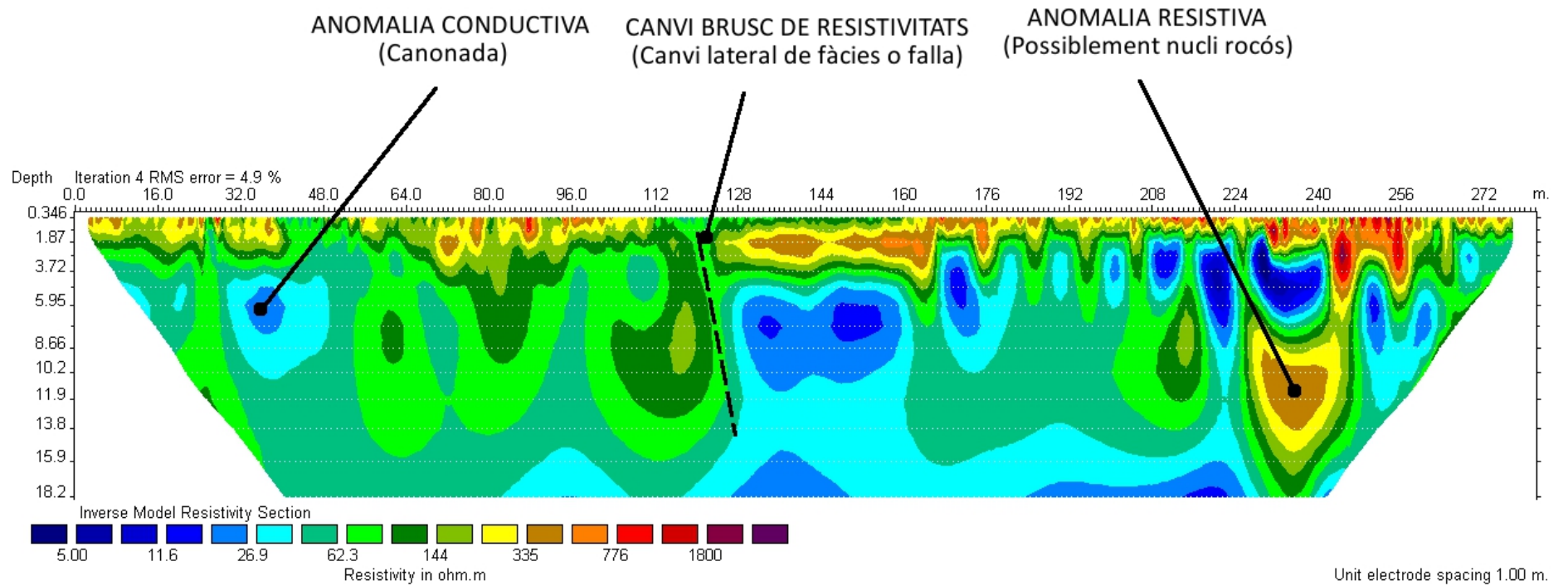


Figura 20: Perfil 1 Esquerre de ERT

3.4.4.2 TRAM 2: PK 0+700-PK 0+800

Els perfils 2 (D) i 2 (E) tenen una longitud de 94 metres cadascun i una profunditat màxima de 18 metres.

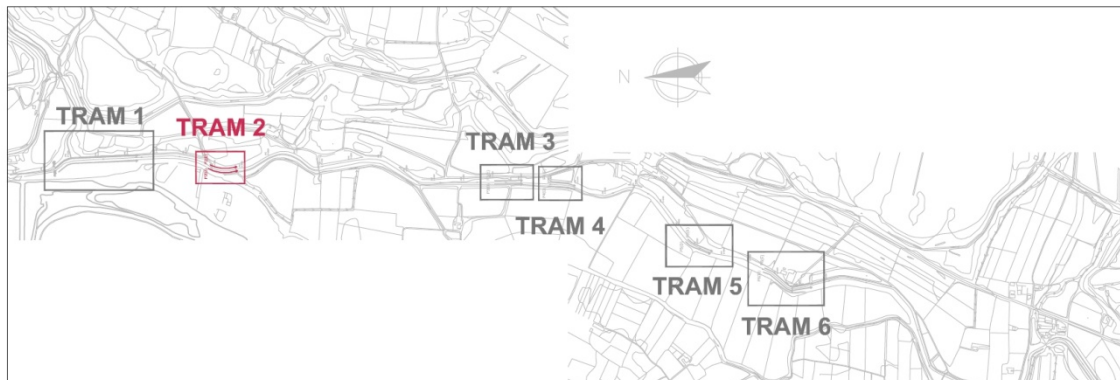


Figura 21: Situació global del Tram 2 en el que s'hi ha realitzat els perfils 2 Dret i 2 Esquerre

PERFIL 2 ESQUERRE

El perfil 2 (E) presenta un nivell superficial molt poc potent amb valors de resistivitat molt elevats (colors vermells i liles), que probablement es deu a una antiga injecció de ciment.

Per sota d'aquest nivell superficial s'hi pot descriure un nivell caracteritzat per resistivitats mitjanes (colors verds) que probablement sigui la formació de guixos amb intercalacions de lutites i marges vista en el perfil anterior.

PERFIL 2 DRET

El perfil 2 (D) és molt similar encara que no s'hi troba el nivell superficial (resistiu). En aquest perfil s'hi poden descriure dos nivells, un de superior caracteritzat per resistivitats mitjanes (igual que en el perfil 2 (E)) i un d'inferior caracteritzat per resistivitats baixes, inferiors a $65\text{ohm}\cdot\text{m}$ (colors blaus), que podria correspondre al basament terciari format per argil·lites amb algunes intercalacions de gresos. El contacte entre aquests dos materials es dona a aproximadament 13 m de profunditat. La realització de sondejos mecànics ajudarà a definir millor la litologia d'aquests materials.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 2 DRET	Tot	13	Contacte

Taula 10: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 2 Dret

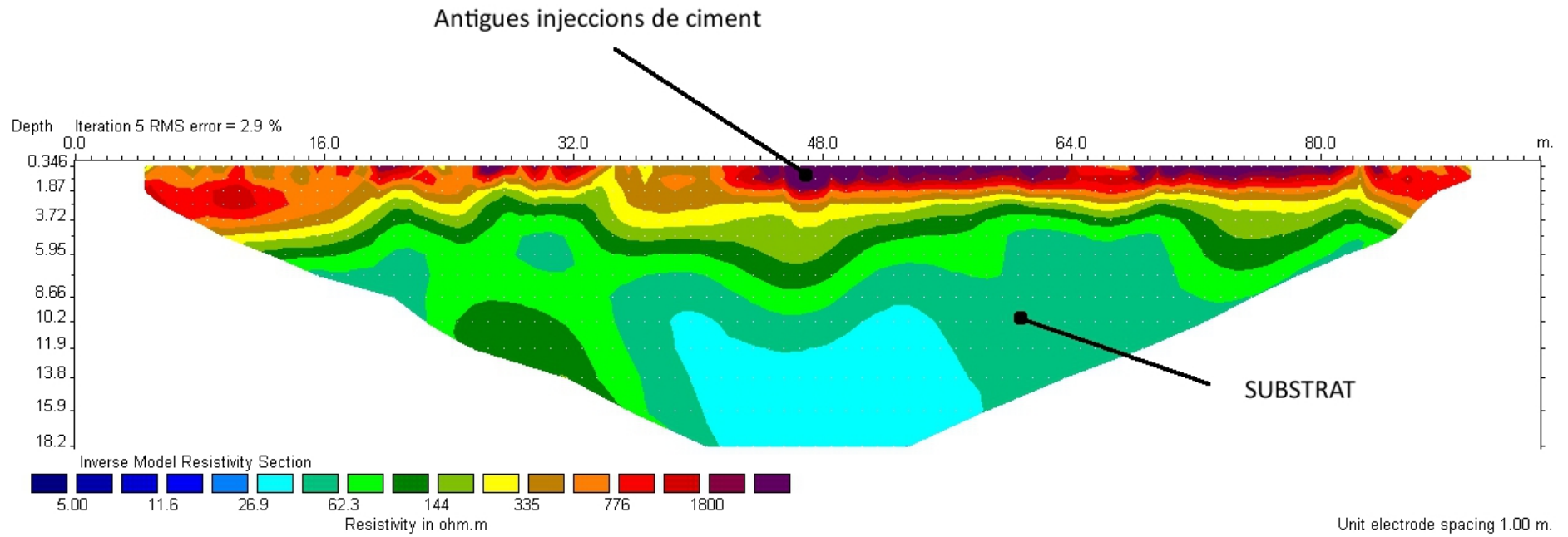


Figura 22: Perfil 2 Esquerre de ERT

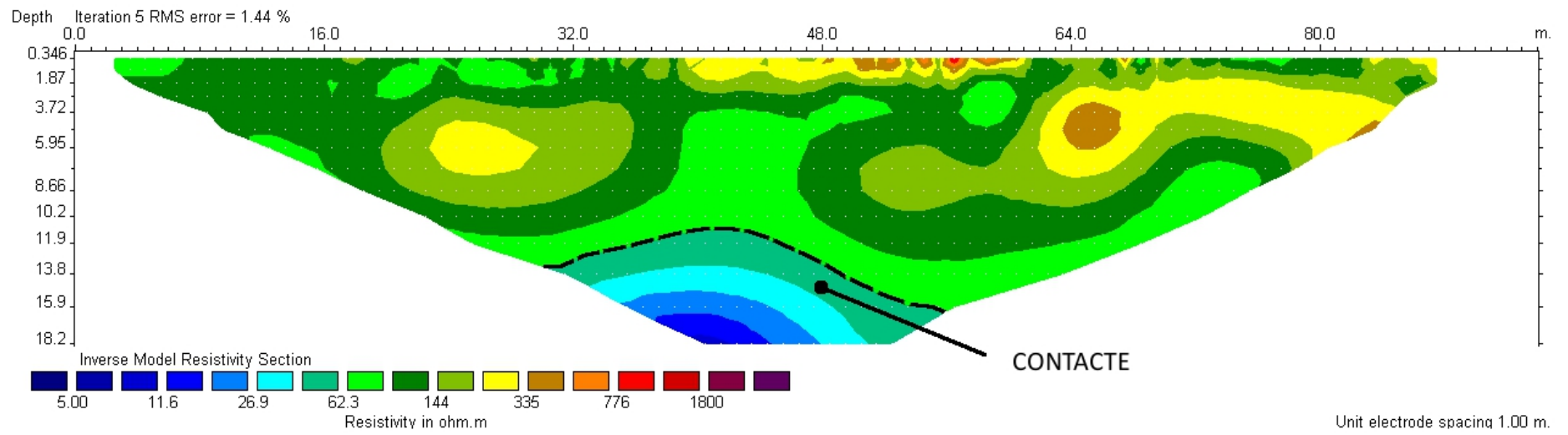


Figura 23: Perfil 2 Dret de ERT.

3.4.4.3 TRAM 3: PK 1+700-PK 1+800

Els perfils 3 (D) i 3 (E) tenen una longitud de 94 metres cadascun i una profunditat màxima de 18 metres.

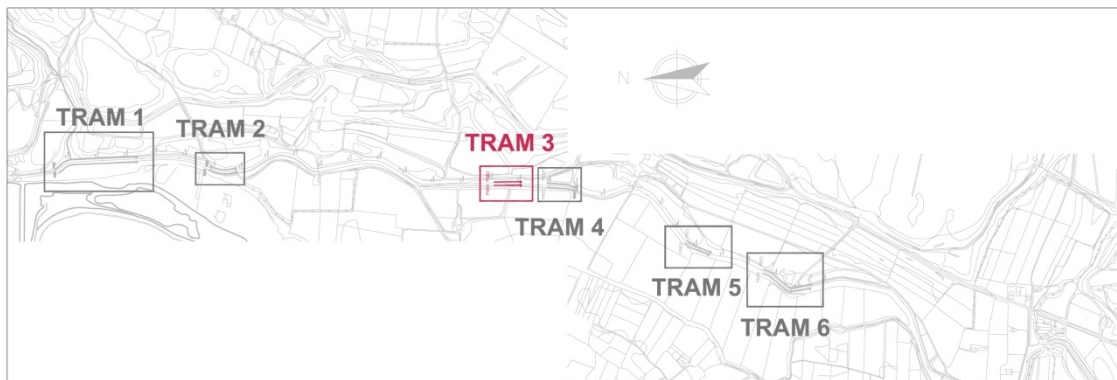


Figura 24: Situació global del Tram 3 en el que s'hi ha realitzat els perfils 3 Dret i 3 Esquerre

PERFIL 3 DRET

El perfil 3(D) torna a presentar un nivell superior poc potent i molt resistent i per sota d'aquest apareix de nou el nivell de resistivitats mitjanes (colors verds). També pot definir-se a uns 13 m de profunditat el contacte amb el nivell inferior de resistivitats més baixes.

Cal destacar que en el perfil 3 (D), a uns 48 metres del inici del perfil, s'hi observa un canvi bruscat de resistivitats dins del nivell de resistivitats intermèdies, que passa de valors de 150 ohm·m (colors verds) a valors superiors als 1000 ohm·m. Aquest canvi pot ser degut a un canvi lateral de fàcies on en la segona meitat del perfil s'hagi detectat un nivell resistent de grava o bé a antigues injeccions de ciment que s'haurien realitzat com a mesura correctora.

Per tal de confirmar la hipòtesis correcta, serà necessari la realització de sondejos mecànics en aquest punt per tal de poder-ho correlacionar amb les dades obtingudes mitjançant la tomografia elèctrica.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 3 DRET	48	2	Canvi bruscat de resistivitats
	Tot	13	Contacte

Taula 11: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 3 Dret

PERFIL 3 ESQUERRE

El perfil 3(E) és molt similar a l'anterior. En aquest s'hi pot descriure el mateix canvi bruscat de resistivitat a uns 48 m del inici del perfil. El fet que a banda i banda del canal es detecti la mateixa anomalia pot indicar que es tracta d'un canvi lateral de fàcies i no d'una injecció de ciment, ja que aquesta última seria de caràcter puntual.

A més també s'hi pot observar una zona entre els 19 i els 28 metres des del inici del perfil on la resistivitat disminueix (colors blaus). Aquesta anomalia es podria associar a una zona on hi existeix una circulació de fluids i per tant, una zona potencial per a que s'hi produeixi un rentat de fins.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 3 ESQUERRE	48	2	Canvi bruscat de resistivitats
	19 -25	9	Conductiva
	Tot	13	Contacte

Taula 12: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 3 Esquerre

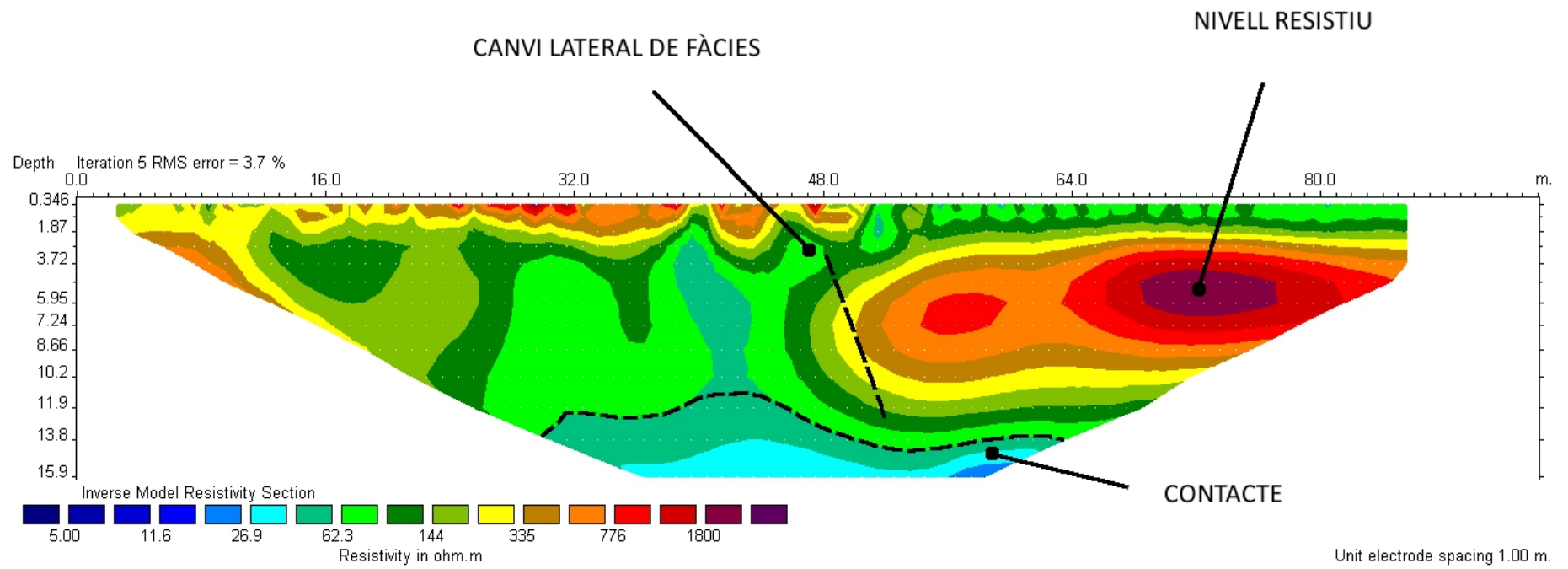


Figura 25: Perfil 3 Dret de ERT

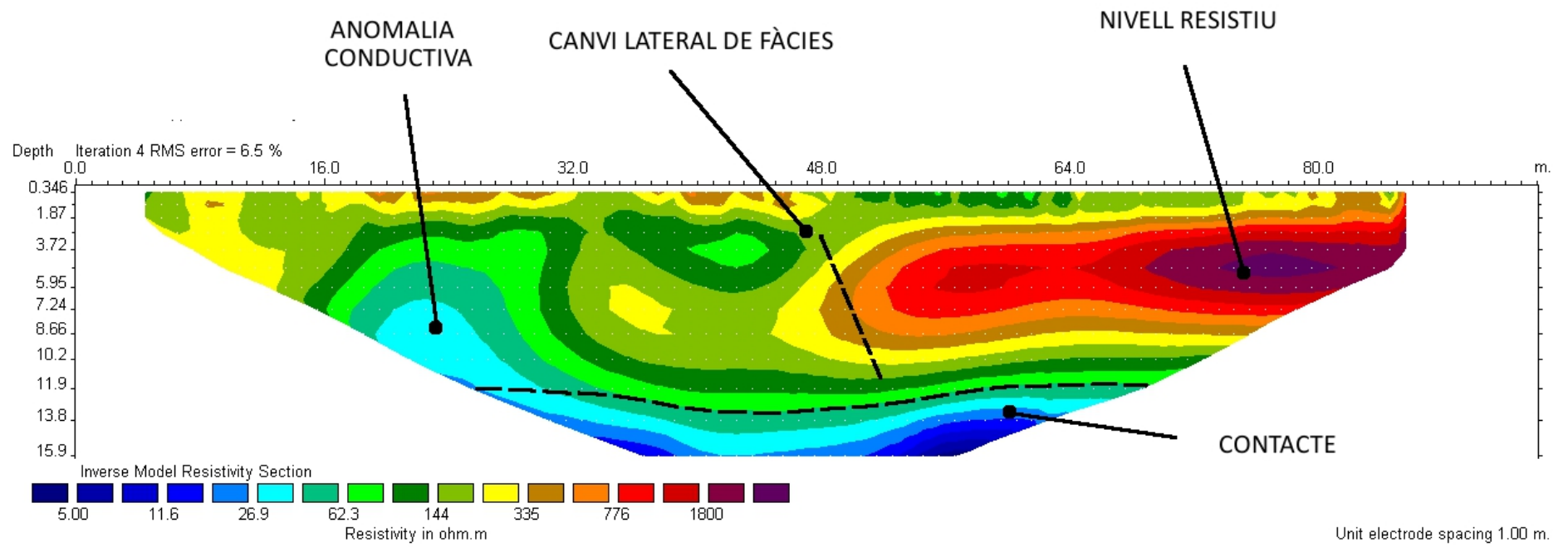


Figura 26: Perfil 3 Esquerre de ERT

3.4.4.4 TRAM 4: PK 1+900-PK 2+000

Els perfils 4 (D) i 4 (E) tenen una longitud de 94 metres cadascun i una profunditat màxima de 18 metres.

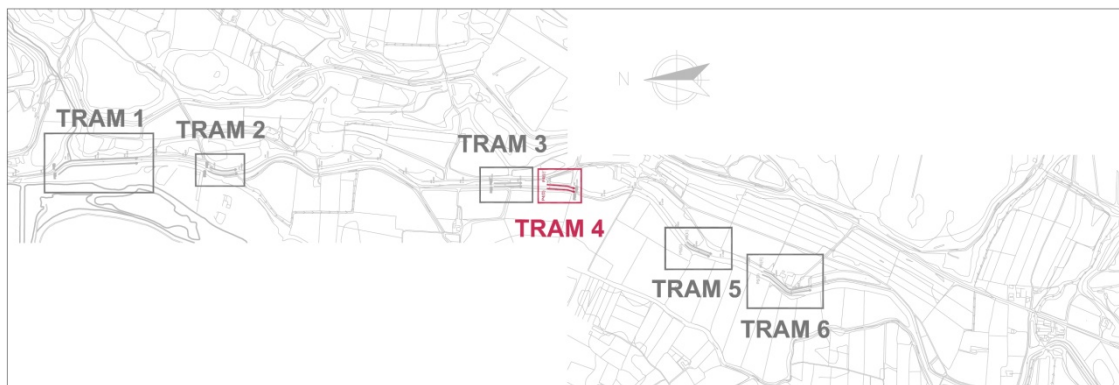


Figura 27: Situació global del Tram 4 en el que s'hi ha realitzat els perfils 4 Dret i 4 Esquerre

PERFIL 4 DRET

En el perfil 4 (D), a uns 34 metres des del inici del perfil i a una profunditat d'uns 9 metres, s'hi pot observar una anomalia resistiva amb valors de resistivitat que superen els 1000 ohm·m. Al no tractar-se d'una anomalia aïllada ja que es troba dins d'un nivell ja bastant resistiu de per sí, és poc probable que es tracti d'una cavitat. Tal i com ja s'ha dit en altres ocasions, per poder-ho assegurar seria necessària la realització de sondejos mecànics en aquest punt.

A 13 metres de profunditat hi torna a aparèixer el contacte amb el nivell inferior de resistivitats més baixes.

Igual que en anteriors perfils, també s'hi presenta una nivell superficial molt poc potent amb valors de resistivitat molt elevats (colors vermells i liles) que probablement es tracti d'antigues injeccions de ciment.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 4 DRET	34	9	Resistiva
	Tot	En superfície	Resistiva
	Tot	13	Contacte

Taula 13: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 4 Dret

PERFIL 4 ESQUERRE

El perfil 4(E) és molt similar a l'anterior. Únicament cal destacar la presència d'una anomalia conductiva a uns 26 metres des del inici del perfil i a una profunditat aproximada de 7 metres. Aquesta anomalia podria tractar-se d'una zona amb circulació d'aigua on s'hi estigui produint rentat de fins i per tant una zona on el risc de generació de cavitats és més elevat.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 4 ESQUERRE	26	7	Conductiva
	Tot	En superfície	Resistiva
	Tot	13	Contacte

Taula 14: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 4 Esquerre

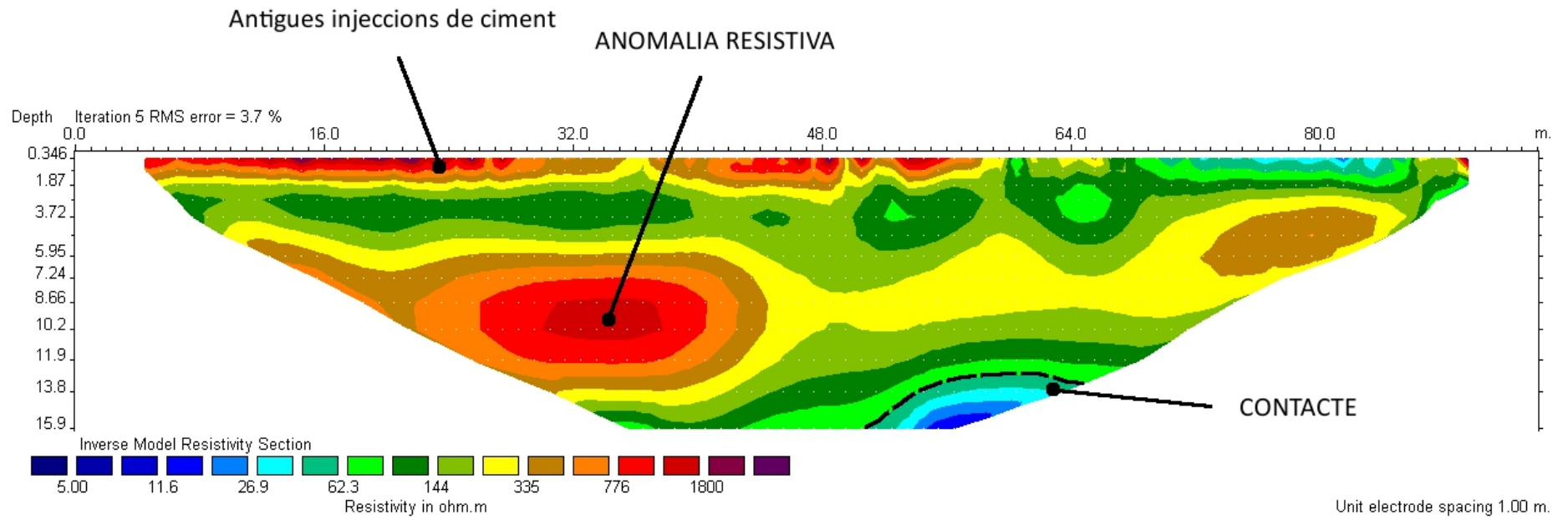


Figura 28: Perfil 4 Dret de ERT

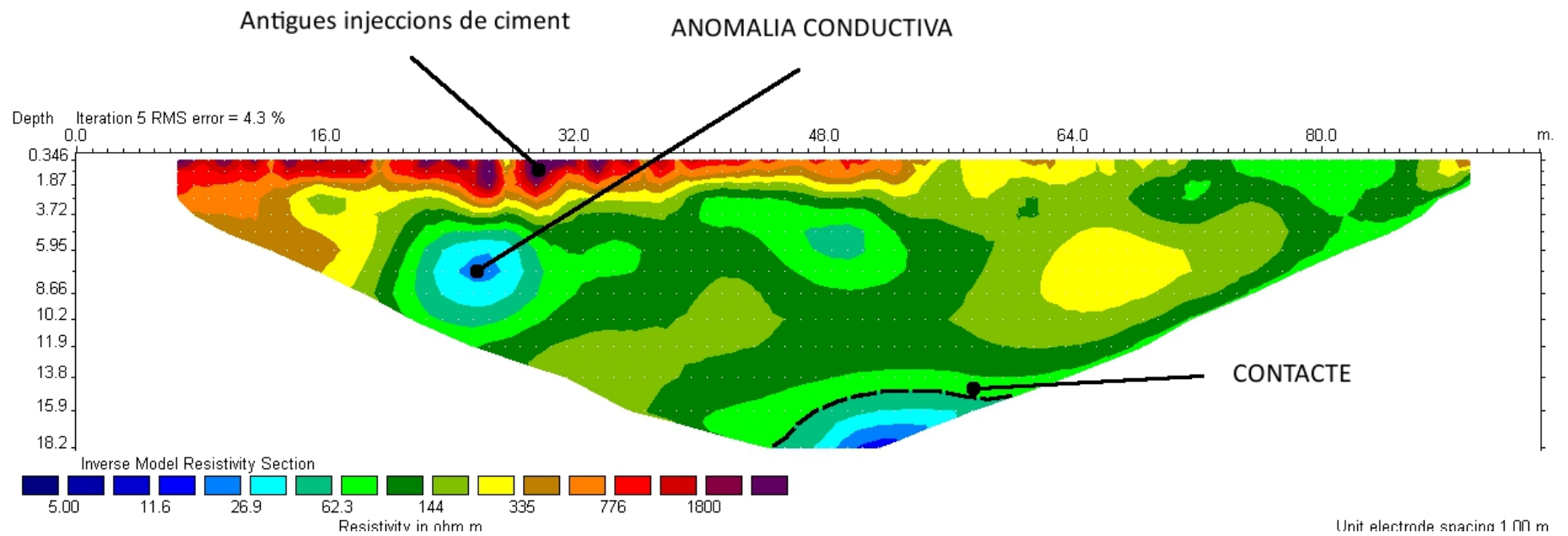


Figura 29: Perfil 4 Esquerre de ERT

3.4.4.5 TRAM 5: PK 2+500-PK 2+600

Els perfils 5 (D) i 5 (E) tenen una longitud de 94 m i una profunditat màxima d'investigació de 18 m.

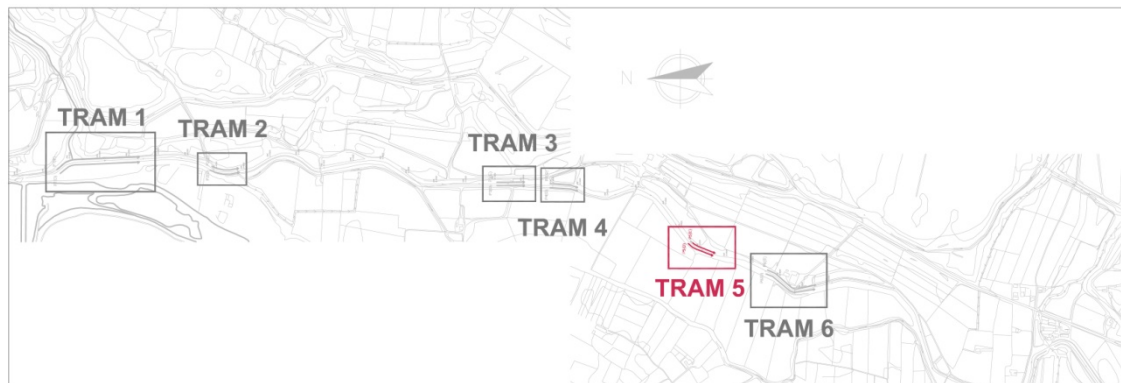


Figura 30: Situació global del Tram 5 en el que s'hi ha realitzat els perfils 5 Dret i 5 Esquerre

PERFIL 5 DRET

El perfil 5(D) ve caracteritzat per un nivell de valors mitjans de resistivitat (colors verds), que sembla tractar-se del nivell que s'ha anat veient en els altres perfils. En aquest cas però, la seva potencia no es la mateixa ja que hi apareix un nivell més resistiu (colors grocs i ocres) que podria tractar-se d'un nivell d'al·luvions i sorra amb valors que arriben als 700 ohm·m. Aquest nivell queda delimitat amb una línia discontinua en la figura 31.

Cal destacar la presència d'una anomalia conductiva situada a uns 16 m des del inici del perfil i a una profunditat d'uns 3,7 m, que podria tractar-se d'una zona en la que hi ha una circulació d'aigua i per tant, una zona amb un risc elevat de generació de cavitats a tenir en compte.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 5 DRET	16	3.7	Conductiva
	Tot	4	Nivell Resistiu
	Tot	13	Contacte

Taula 15: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 5 Dret

PERFIL 5 ESQUERRE

El perfil 5 (E) presenta també una anomalia conductiva a 10 m des del inici, no tant marcada i a una profunditat igual que en el marge dret del canal. En aquest s'hi pot observar un nivell intermedi caracteritzat per resistivitats elevades, del ordre dels 1500 ohm·m on el nucli més resistiu es troba a partir d'uns 60 metres des del inici del perfil (colors vermells i liles). Aquest nivell intermedi també s'intueix en el perfil 5 (D) tot i que en aquest cas els valors de resistivitat no són tan elevats com en el perfil del marge esquerre. Els valors de resistivitat tant elevats indiquen que es tracta d'antigues injeccions de ciment.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 5 ESQUERRE	10	3.7	Conductiva
	Tot		Nivell Resistiu
	Tot	13	Contacte

Taula 16: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 5 Esquerre

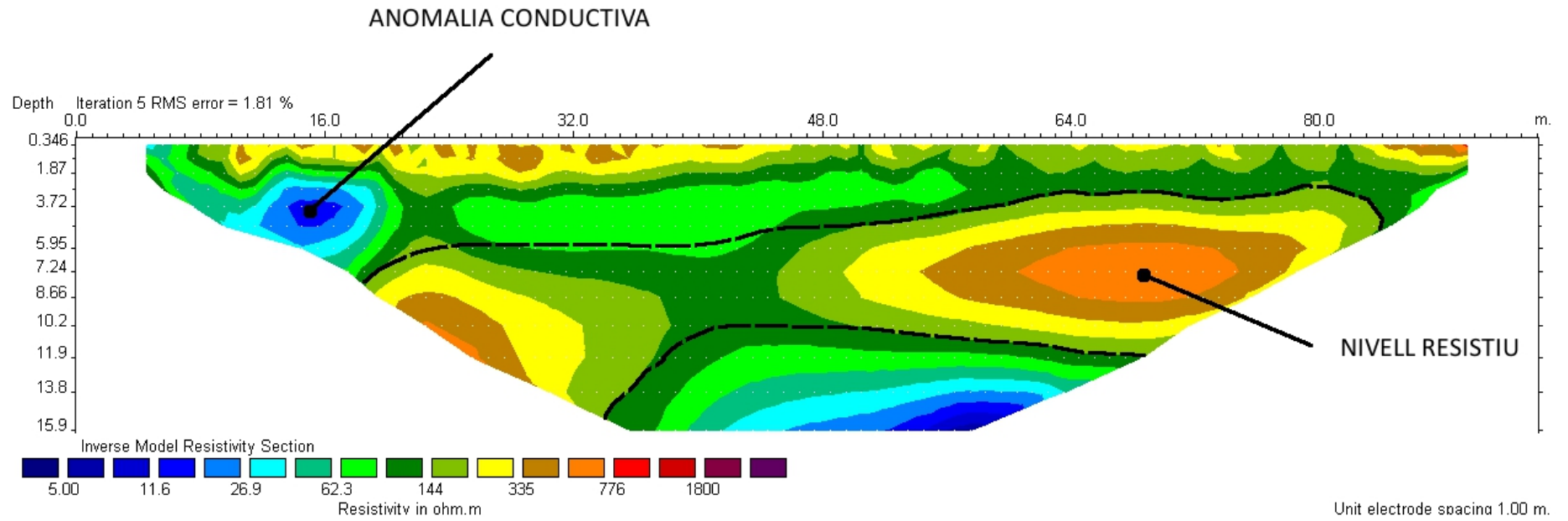


Figura 31: Perfil 5 Dret de ERT

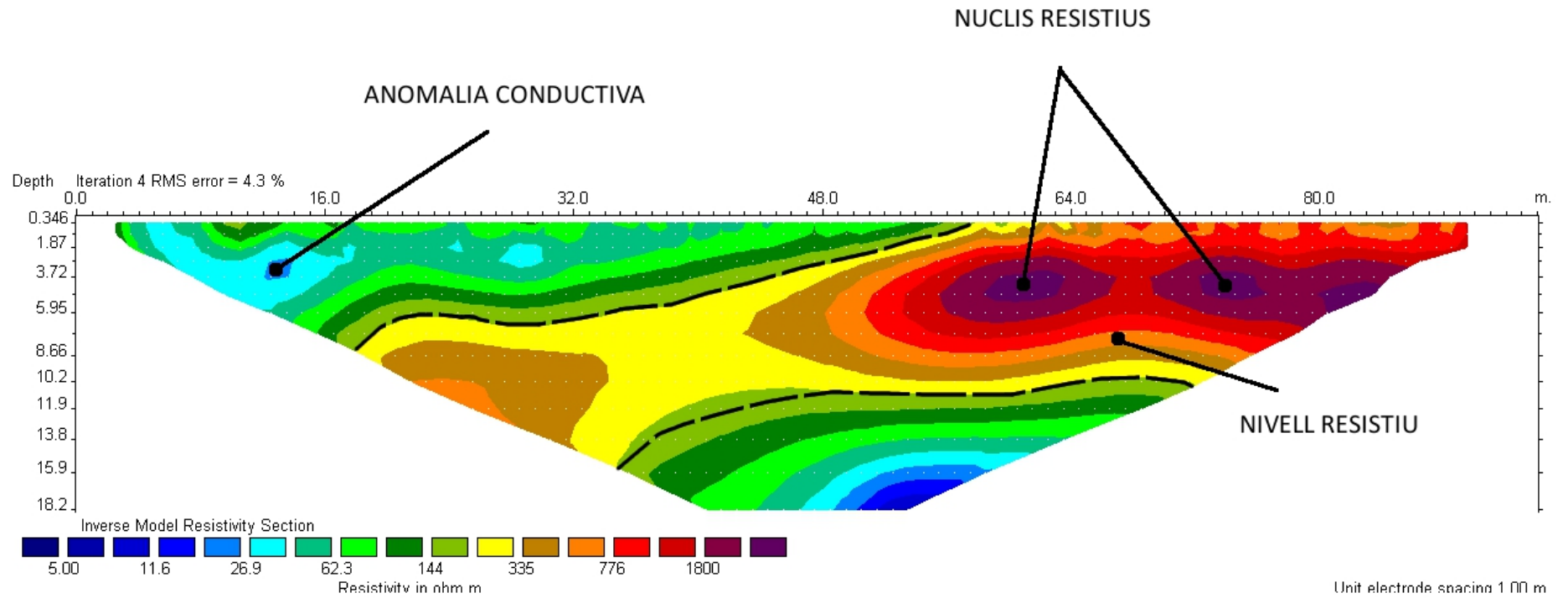


Figura 32: Perfil 5 Esquerre de ERT

3.4.4.6 TRAM 6: PK 2+800-PK 3+000

Per poder cobrir aquest tram s'han realitzat dos perfils de 94 m a cada marge del canal. Per tal d'unir els dos perfils s'ha utilitzat la opció *concatenate* del programa RES2DINV utilitzada ja en el perfils del tram 1. Els nous perfils reben el nom de Perfil 6 Dret i Perfil 6 Esquerre, però en realitat aquests són la unió de 2 perfils.

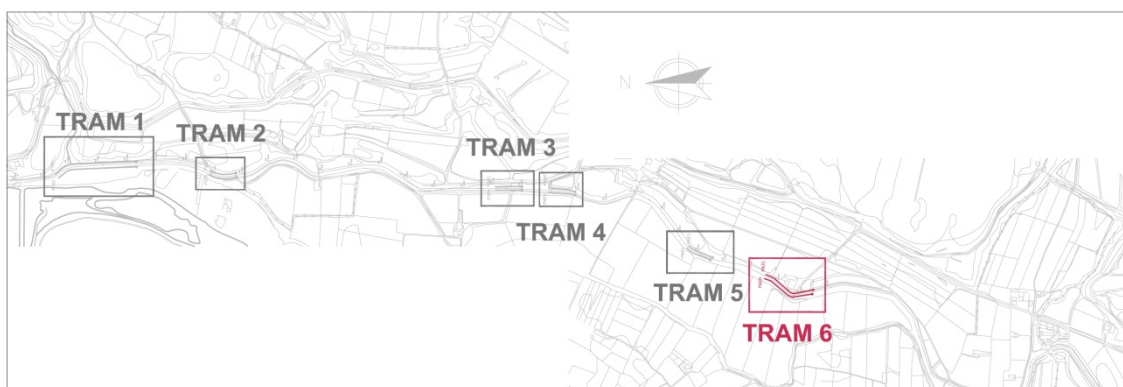


Figura 33: Situació global del Tram 6 en el que s'hi ha realitzat els perfils 6 Dret i 6 Esquerre

PERFIL 6 DRET

El perfil 6 (D) presenta un nivell caracteritzat per resistivitats de mitjanes a altes amb valors que oscil·len entre els 150 ohm·m gairebé 700 ohm·m, que podria tractar-se del nivell d'al·luvions i sorres que s'havia trobat en perfil 5 (D) i (E). Aquest nivell més resistiu es troba interromput a aproximadament 85 m del inici del perfil per una zona de baixa resistivitat (colors blaus). D'aquesta anomalia no se'n pot fer massa cas, ja que al fer la unió dels dos perfils, en la zona intermèdia no es disposa de dades reals i els resultats que s'obtenen són fruit de la interpolació del propi programa.

Al final d'aquest perfil, sembla que s'intueix el contacte amb el nivell inferior de resistivitats més baixes que s'havia trobat en els perfils drets i esquerres 2, 3, 4 i 5.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 6 DRET	Tot	4.5	Nivell Resistiu
	Tot	13	Contacte

Taula 17: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 6 Dret

PERFIL 6 ESQUERRE

En el perfil 6 (E) també s'hi pot observar un nivell resistiu però en aquest cas els valors de resistivitat són molt majors, arribant a superar els 1500 ohm·m (colors vermells i liles).

La gran diferencia de resistivitats entre aquest nivell i l'observat en el marge oposat pot indicar que en aquest marge, l'augment de resistivitats sigui a causa d'antigues injeccions de ciment. Per tal de corroborar aquesta interpretació seria aconsellable la realització d'un sondeig mecànic en aquest punt del marge esquerre.

Al final d'aquest perfil, s'hi pot intuir, igual que en el marge oposat, el contacte amb el nivell inferior de resistivitats més baixes.

	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)	TIPUS D'ANOMALIA
PERFIL 6 ESQUERRE	Tot	3.5	Nivell Resistiu
	Tot	13	Contacte

Taula 18: Situació, profunditat i tipus d'anomalies del perfil 6 Esquerre

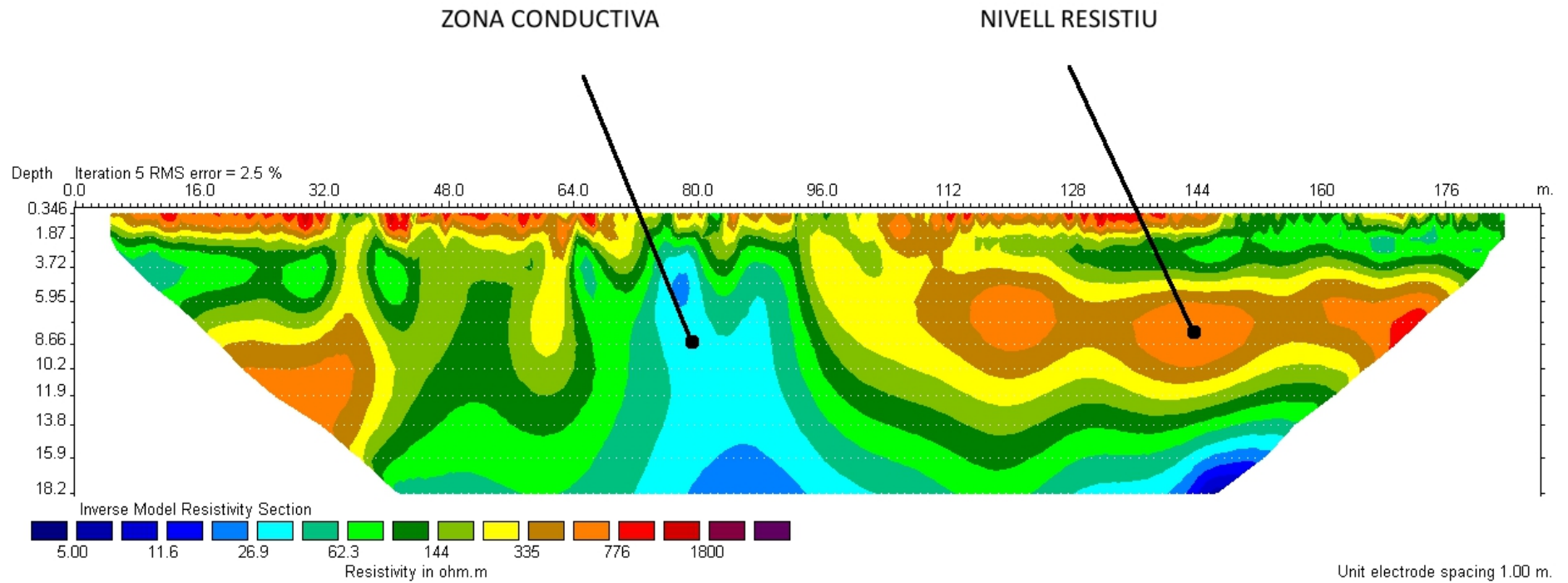


Figura 34: Perfil 6 Dret de ERT

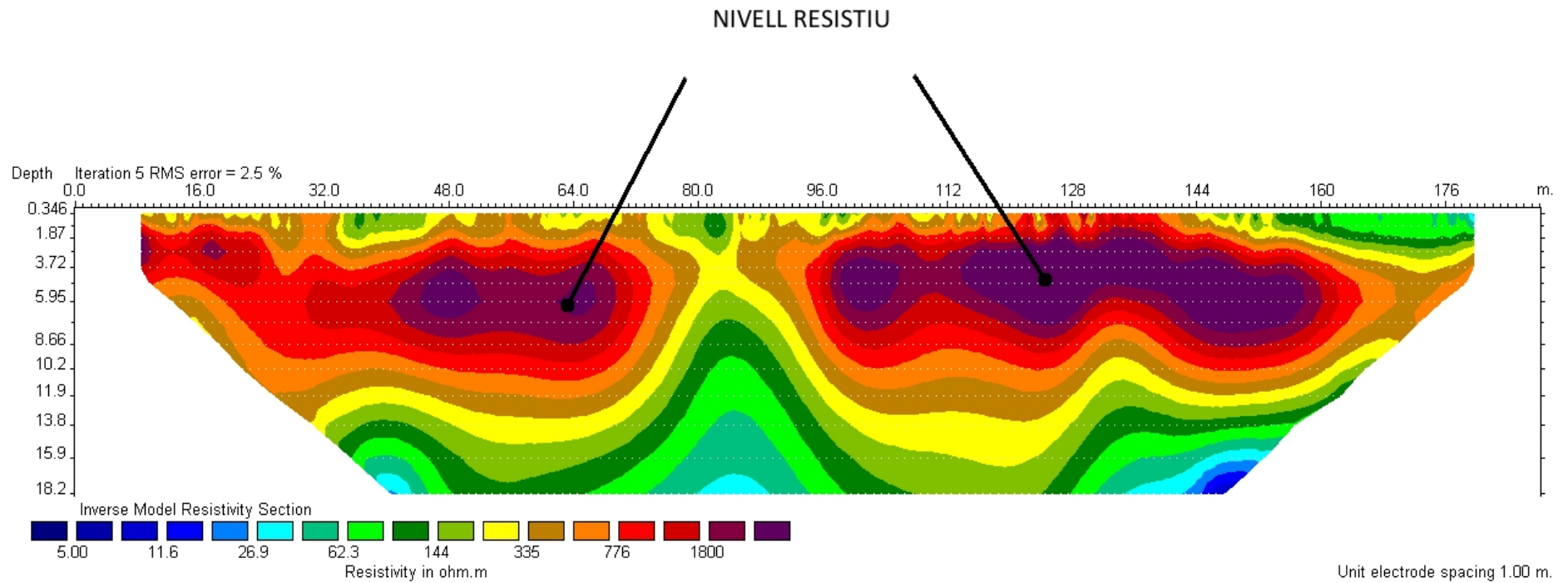


Figura 35: Perfil 6 Esquerre de ERT

3.5 APLICACIÓ DEL GEO – RADAR (GPR) A L'ESTUDI DEL CANAL DE BALAGUER.

3.5.1 PLANIFICACIÓ DE LA CAMPANYA DE RECONeixEMENT

Els aspectes més importants que s'hauran de definir són:

- Delimitar els objectius: L'objectiu de la campanya de prospecció és caracteritzar el subsòl en diferents trams del canal de Balaguer, per tal de determinar la localització de possibles cavitats que puguin existir, així com localitzar filtracions d'aigua i delimitar aquelles zones que siguin més susceptibles de patir un rentat de fins o que ja l'hagin patit. Tot això permetrà restablir la identitat del canal i tenir una base de dades per a posteriors campanyes de manteniment.
- Escollir l'equip de GPR avaluant les seves limitacions: L'equip utilitzat per a aquest estudi ha estat un GPR model SIR 3000 de l'empresa americana *Geophysical Survey Systems, Inc.* A diferència d'altres equips de GPR, el SIR 3000 permet treballar amb la constant dielèctrica dels diferents medis enlloc de la velocitat de propagació. El mateix equip SIR-3000 aporta una taula amb les diferents constants dielèctriques dels materials.(veure taula 5)
- Selecció de la freqüència de les antenes: Tenint en compte, tal i com ja s'ha explicat, que les freqüències elevades tenen més resolució a poca profunditat, mentre que les de baixa freqüència penetren més en el terreny però tenen menys resolució, en aquest estudi s'ha decidit utilitzar antenes de 400 MHz de freqüència central, que són les que proporcionen una millor resolució en el rang de profunditat que interessa en aquest estudi (0 – 3m).
- Resolució espacial: Espaiat horitzontal de les dades. Tracta de definir un interval espacial en el que es prendran les mesures al llarg dels perfils realitzats. Això permetrà obtenir una secció en la que es representin temps dobles (TWT) en les ordenades i distàncies horitzontals en les abscisses. En aquest cas s'ha optat per un espaiat de 0.025m, ja que els perfils no són de gran longitud.
- La finestra de temps dobles: Aquesta normalment s'obre just abans que el pols sigui emès i es tanca després que totes les reflexions d'interès provinents del subsòl s'hagin registrat. Generalment els geo-radars permeten a l'usuari seleccionar el valor de la finestra temporal. Si la velocitat del material i la profunditat aproximada a la que es troba l'objectiu són conegudes és possible estimar la quantitat de temps necessari per que el senyal arribi a

l'objecte, és produeixi la reflexió i aquest arriba a l'antena receptora. El valor de la finestra de temps dobles depèn de la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques en el subsòl que ve determinada per la constant dielèctrica relativa o permitivitat elèctrica $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ on c és la velocitat de la llum en el buit i ϵ la constant dielèctrica relativa o permitivitat elèctrica relativa.

- La resolució temporal: Número de mesures que es realitzen per a la finestra de temps dobles seleccionada. Aquest paràmetre seria l'equivalent a la resolució vertical (condicionada per la freqüència de l'antena utilitzada).

I ja per últim, abans de començar amb presa de mesures és necessari determinar la manera amb la que es recollirà la informació respecte a les variacions topogràfiques del perfil. En aquest estudi no hi ha grans variacions topogràfiques i per tant aquest punt no és tindrà en compte.

3.5.2 METODOLOGIA DE CAMP I ADQUISICIÓ DE LES DADES

L'adquisició de les dades es pot fer de diferents formes:

- En mode continu: L'adquisició de les dades es fa de forma continua a mesura que les antenes són desplaçades pel terreny. A més, aquest procés, pot realitzar-se establint un número fix de mesures per a cada interval de temps o bé establint un número de mesures per unitat de distància. En aquesta tesina les dades s'han pres de manera continua establint un número de mesures per unitat de distància. Per poder realitzar aquestes mesures és necessari que l'equip de GPR tingui un odòmetre. El cas de mesures per a cada interval de temps se sol utilitzar quan es fan campanyes de geo-radar on el radar està muntat o bé en un vehicle o inclús en un tren.

- En mode punt a punt: Les antenes es situen sobre el terreny en el punt on és volen prendre les mesures i llavors es realitza l'emissió de les ones electromagnètiques que són enregistrades per l'antena receptora.

Existeixen altres mètodes per adquirir les dades com ara:

- Perfils de reflexió: Aquesta modalitat és la més habitual i la que s'ha utilitzat en aquest estudi. Aquesta consisteix en desplaçar les antenes sobre l'objectiu mantenint fixa la

distància entre elles, fet que permet obtenir una secció en la que es representen els temps dobles en ordenades i la distància horitzontal en les abscisses. Aquest tipus de registres és similar al que s'utilitza en sísmica de reflexió i sonar. La profunditat dels reflectors es pot determinar si es coneix la velocitat de propagació del impuls electromagnètic a través del terreny, o per correlació amb sondeigs efectuats en punts sobre el perfil (figura 36)

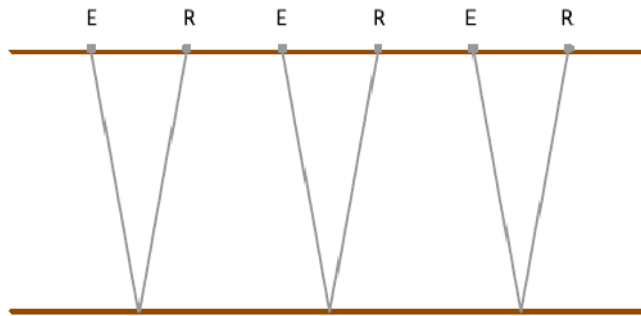


Figura 36: Mètode d'adquisició de dades, Perfils de Reflexió

- La Transil·luminació: Aquest mètode s'utilitza per determinar la velocitat de propagació i l'atenuació del terreny de forma anàloga a la tomografia. Aquesta modalitat es pot utilitzar quan les antenes es poden col·locar a ambdós costats de l'objectiu com ara en l'interior de mines o sondejors (figura 37).

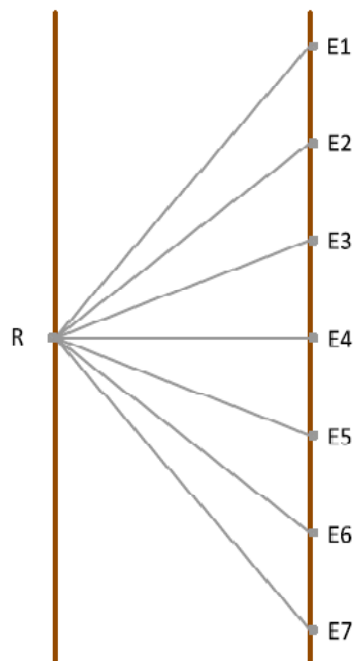


Figura 37: Mètode d'adquisició de les dades, Transil·luminació

- Perfils CMP (CommonMidPoint) o CDP (CommonDepthPoint). Aquest tipus de mètode serveix per determinar la velocitat de propagació de les ones en el subsòl. Aquest s'utilitza quan no es té la suposició que les característiques del reflector siguin les mateixes, en aquest cas, tant l'emissor com el receptor es mouen allunyant-se l'un de l'altre mentre que el punt mitjà de reflexió entre ambdós es manté en la mateixa posició (figura 38 a)

- Perfils WARR (Wide-Angle Reflection – Refraction). En aquest mètode l'emissor es manté fix en un punt i el receptor es mou incrementant la distància entre l'emissor i el receptor. La finalitat principal d'aquesta modalitat és, igual que amb els CMP, determinar la velocitat de propagació de les ones en el subsòl. Aquest mètode s'ha de fer en una àrea on els reflectors principals siguin plans o estiguin inclinats amb angles molt suaus i que per tant, es pugui assumir que les característiques dels reflectors són les mateixes sobre l'àrea del subsòl per on el perfil s'està realitzant (figura 38 b).

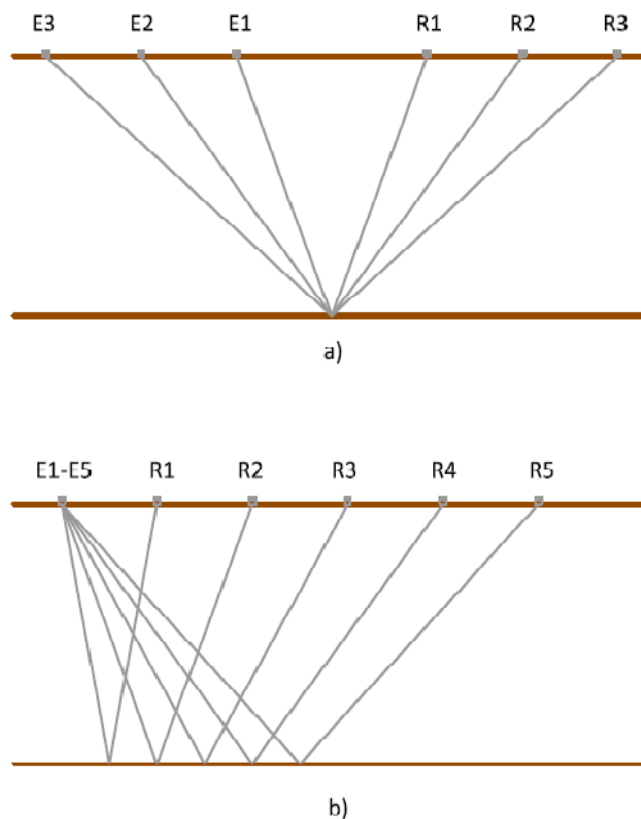


Figura 38: Mètodes d'adquisició de dades, a) Mètode CMP, b) Mètode WARR, E indica la ubicació de l'emissor i R denota la ubicació del receptor

En primer lloc, mitjançant la unitat central, es programa un pols electromagnètic generant amb la antena emissora/receptora una ona electromagnètica amb una freqüència característica. Tal i com ja s'ha dit, en aquest estudi s'ha utilitzat una freqüència de 400 MHz.

La ona electromagnètica es va propagant a través del medi, fins que arriba a una zona o objecte, on les propietats electromagnètiques són diferents respecte les circumdants o adjacents. Degut a aquest contrast de les propietats electromagnètiques es genera una anomalia.

Una part de l'energia electromagnètica de la ona es segueix propagant i una altra es reflexa cap a la superfície. Aquesta energia que es continua propagant generarà successives reflexions.

La ona electromagnètica reflectida es rep a través de l'antena receptora i es registra a la unitat central per al seu posterior tractament i interpretació.

Mentre l'equip de GPR va repetint aquest procés, la persona que està realitzant la presa de mostres va avançant amb el carret que transporta el GPR per tal que aquest enregistri el perfil.

En aquest estudi s'han fet 55 perfils dels quals 35 són longitudinals amb una longitud variable en funció de la zona d'estudi, generalment de entre uns 80 i 140 metres i 20 de transversal que no superaven els 4 metres de l'ample del canal.

3.5.3 TRACTAMENT DE LES DADES

3.5.3.1 PROCESSAT

Per tal de poder interpretar les dades de la campanya de GPR és necessari fer un processat de les dades. Per fer-ho s'ha utilitzat el programa d'anàlisi i tractament 2-D de senyals de GPR ReflexW de la casa *Sandmeier Scientific Software*.

REFLEXW

Al iniciar el programa s'ha de definir el directori on s'ubicarà el projecte i crear-ne un de nou. Un projecte està format per un conjunt de fitxers amb extensions diferents. Aquests fitxers es guardaran en 6 carpetes, de les quals les més importants que cal conèixer són la carpeta "Rohdata", on s'hi guarden els fitxers que s'importen al programa i la carpeta "Procdata", on s'hi desen els fitxers un cop processats.

Aquest programa és de caràcter modular. Per tant, és pot seleccionar el mòdul que més escaigui en funció de les necessitats del projecte. En aquest cas el mòdul seleccionat és “2D-data-analysis”, ja que el que s’ha de processar són perfils en 2 dimensions.

Prèviament al inici del processat s’han d’importar els fitxers obtinguts al camp. Un cop ja s’han convertit els formats del fitxers es procedeix al filtratge de cadascun del perfils i en cas que fos necessari, el que es coneix com a guanys, que no es res més que amplificar el senyal allà on és necessari. A continuació s’expliquen els filtres i els guanys empleats en el processat de les dades de la zona d’estudi.

FILTRE 1D DEWOW

El filtre 1D *Dewow* acostuma a ser el primer filtre que s’utilitza. En aquest procés es calcula l’amplitud mitja d’una finestra temporal centrada en cada punt de cada traça, i es resta aquest valor a l’amplitud absoluta del punt on s’ha centrat la finestra, aconseguint així que si una traça està desviada cap a amplituds positives o negatives quedi centrada.

FILTRE MOVE TO STARTTIME

Un cop aplicat el filtre *Dewow*, el segon filtre que s’ha aplicat és *Move start time*. Aquest filtrat el que fa és moure les traces a temps zero. Normalment cada traça de la línia al seu començament hi tenen un espai de temps on la seva amplitud és zero. Per tal que la profunditat del perfil sigui el més propera a la realitat cal eliminar aquest espai de temps.

FILTRE PASSA-BANDA

El següent filtre que s’ha aplicat ha estat un filtre passabanda. Aquest elimina el senyal produït per fonts de molt baixa o de molt alta freqüència, deixant només els senyals produïts pel geo-radar.

FILTRE ENERGYDECAY, GUANY

Un cop aplicats aquests tres filtres s’ha optat per aplicar el que es coneix com a guany. Aquest es fa amb la intenció d’augmentar l’amplitud de les traces en profunditat, ja que aquestes s’atenuen progressivament en profunditat. Els guanys, doncs, han d’augmentar més l’amplitud de les reflexions més profundes que les de les més superficials.

FILTRE 2D BACKGROUNDREMOVAL.

I ja per últim, el filtre que s’ha aplicat serveix per eliminar part del soroll de fons que dificulta la interpretació del senyal. Aquest filtre és conegut com a *Back ground removal*.

3.5.4 RESULTATS OBTINGUTS I INTERPRETACIÓ DE LES DADES

En la campanya de GPR s'han realitzat 55 perfils situats en la solera del canal, dels quals 35 són longitudinals al canal des del PK 0+00 al PK 2+950 i 20 transversals. En total s'han cobert 3373.74 metres.

Inicialment el que es pretenia era cobrir amb una malla la solera del canal, és a dir, recorre la solera per la banda dreta, seguidament la banda esquerra i ja per últim, fer alguns perfils transversals al canal, però, un cop al camp, es va decidir que només es farien perfils per una de les bandes de la solera, i, en cas que es cregués necessari, es faria una passada per l'altra banda.

La situació dels perfils de Geo-Radar està representada en l'Annex I.

Degut a la gran quantitat de metres de perfil realitzats, en aquest apartat es presentaran únicament aquells perfils on s'han detectat diferents estructures i es numeraren els perfils, que es podran localitzar en l'Annex I.

3.5.4.1 PERFILS LONGITUDINALS

El processat dels perfil longitudinals realitzats ha permès la detecció de varies hipèrboles de difracció. La gran majoria d'aquestes es troben a una profunditat inferior a 1 metre i són de petit diàmetre. Se sap que el substrat sota la solera del canal presenta graves (molt comuns en la zona). A més en alguns dels perfils s'han detectat algunes zones de col·lapse just per sota de la llosa de formigó que revesteix el canal. Així doncs, es pot concloure dient que la majoria de les hipèrboles de difracció són degudes a còdols o petites irregularitats sota el subsòl. Tot i així el geo-radar ha permès detectar altres estructures que no eren objecte d'interès, però que pot ser interessant determinar la seva localització, com ara aquelles zones reforçades amb formigó armat, l'estratigrafia del terreny natural i les zones suposadament reomplertes amb material de reblert.

Cal destacar que alguns trams del canal estaven inundats d'aigua, fet que va obligar a interrompre alguns dels perfils, ja que l'aigua produeix la atenuació del senyal i per tant no permet interpretar amb claredat les estructures existents just a sota. Tot i així, en alguns del perfils és va decidir continuar emeten el senyal. Aquestes observacions i altres evidències externes, es van anar apuntant degudament en la llibreta de camp durant el període de realització de la campanya de GPR. Aquesta llibreta de camp s'ha transcrit i es pot consultar en l'Annex IV.

Com es pot veure en la figura 39, perfil longitudinal 7, les armadures, al tractar-se d'un element metàl·lic, presenten unes reflexions característiques, a més d'impossibilitar la detecció d'altres estructures existents a més profunditat. Cal dir que la seva localització no era objecte d'estudi però que en cas de ser-ho, si s'hagués utilitzat una antena amb una freqüència més elevada, no només s'hagués pogut detectar l'existència d'armadura sinó que a més, s'hagués pogut determinar la densitat d'aquesta.

Aquest tipus de reflexions es repeteixen en molts dels perfils longitudinals, fet que reafirma la gran quantitat de mesures correctores que s'havien aplicat amb anterioritat.

En la part final dels perfils de la figura 40 (zona marcada amb línia discontinua), corresponents als perfils longitudinals 1 (a) i 10 (b), equivalents entre ells, s'hi pot observar una inclinació dels reflectors. Aquest fet ens indica que es tracta d'un nivell geològic, terreny natural sedimentat, i que el que s'observa en el radargrama és el paral·lelisme dels estrats d'aquest terreny. Aquest tipus d'estructura es repeteix en el perfil 16, representat en la figura 41.

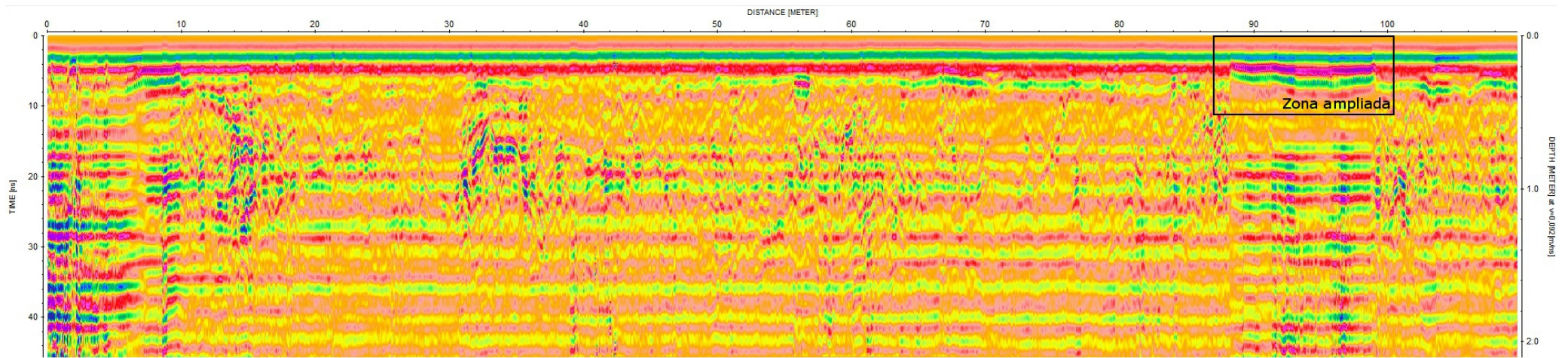
Tot i no disposar de la geologia local de la zona, la campanya de GPR ha permès discretitzar entre diferents tipus de sòl. En la figura 42 s'hi pot observar un comportament diferencial dels reflectors. Un primer nivell caracteritzat per uns reflectors continus d'una amplitud elevada que correspon a la llosa de formigó de la solera del canal, seguidament i separat per una primera línia discontinua, s'observa un nivell on els reflectors es comporten de forma més caòtica i per tant sense poder percebre una continuïtat d'aquests, es creu que aquest nivell podria tractar-se de material de reblert col·locat en el moment de la construcció del canal, i ja per sota d'aquest i separat per una segona línia discontinua, s'hi pot veure un nivell caracteritzat per uns reflectors bastant continus amb una amplitud moderada, aquest podria tractar-se de terreny natural de la zona, o inclús podria tractar-se de soroll. En tot cas, per tal de confirmar-ho seria necessari la realització d'un sondeig mecànic.

En les figures 43, 44 i 45, corresponents als perfils longitudinals 15, 25 i 26, s'han detectat zones on el comportament dels reflectors sembla indicar que s'ha produït un col·lapse del terreny (marcades amb una línia discontinua). Aquestes zones són d'especial interès, i es recomana realitzar algun tipus d'assaig de control sobretot en cas de que s'hi observin clares evidències de soscavament.

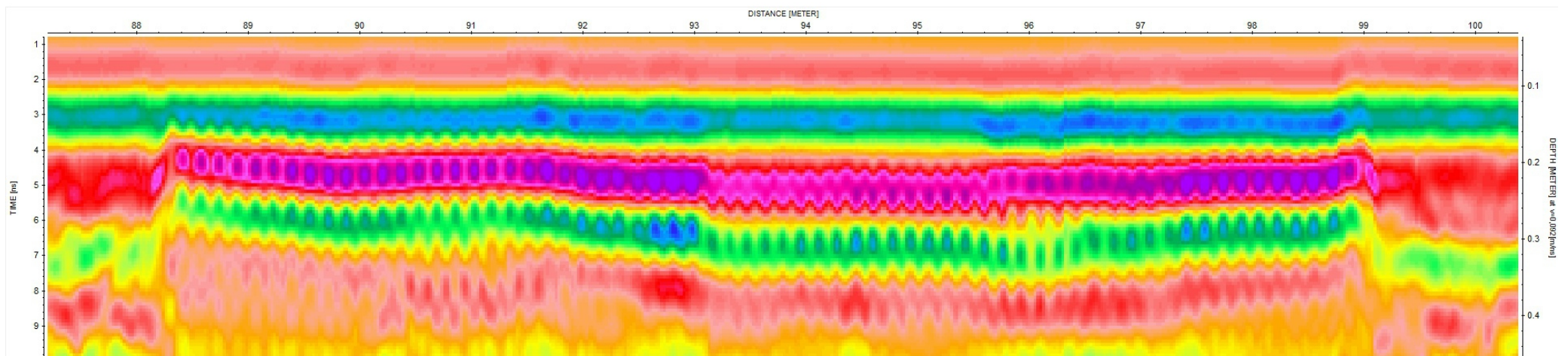
En la figura 46, que correspon al perfil longitudinal 21, marcada amb una línia discontinua, s'hi observa una hipèrbola de difracció. El fet que aquesta es trobi aïllada i a una

profunditat, respecte la resta d'hipèrboles detectades, major li dona més rellevància. Aquesta però s'acaba associant a un rebot aeri, ja que consultant la llibreta de camp, a 43 m del inici del perfil, on apareix la hipèrbola de difracció, es va passar per sota d'un pont. No és tant important la seva localització com la seva correcta interpretació.

També s'han detectat comportaments dels reflectors que no s'han pogut interpretar per falta de dades (figures 47 i 48), en aquest cas es recomana fer un seguiment d'aquests punts.



a)



b)

Figura 39: a) Perfil longitudinal 7. b) Imatge en detall del perfil 7 on s'hi poden veure les reflexions produïdes per l'existència d'armadura.

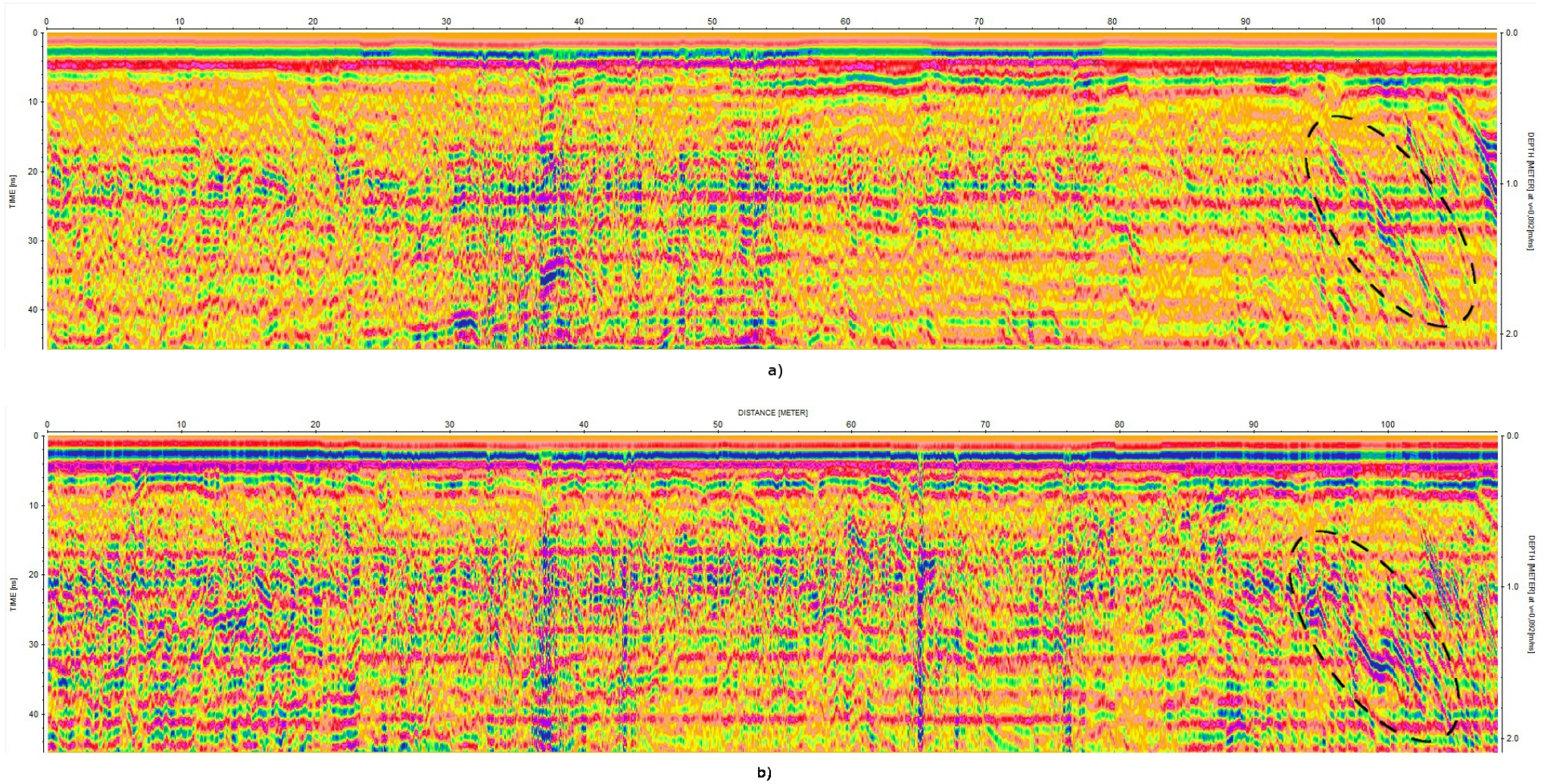


Figura 40: Exemple de dos perfils on s'hi pot observar el paral·lelisme dels estrats inclinats del terreny natural. a) Perfil 1 b) Perfil 10. Ambdós equivalents.

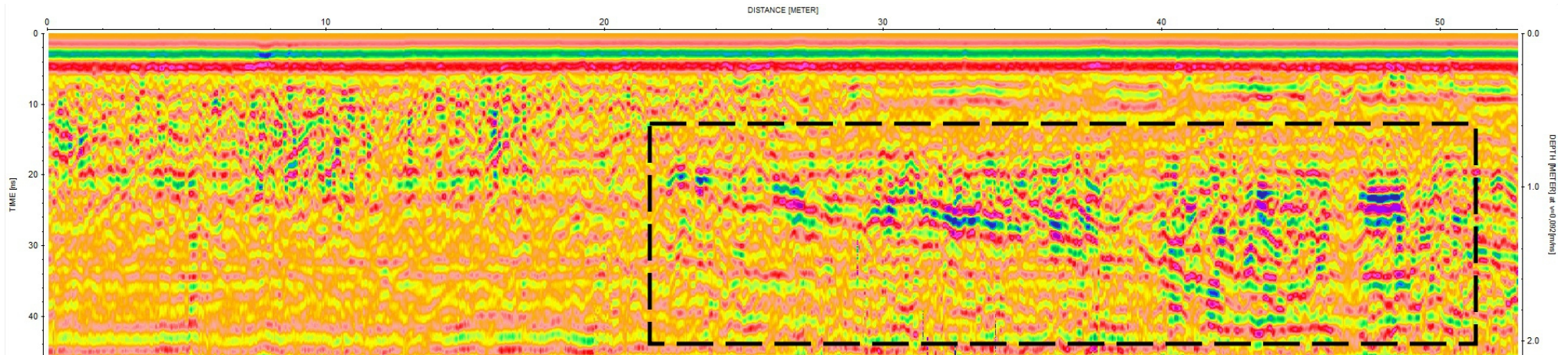


Figura 41: Perfil 16 longitudinal. Igual que en la figura anterior, s'hi percep l'estratigrafia del terreny natural.

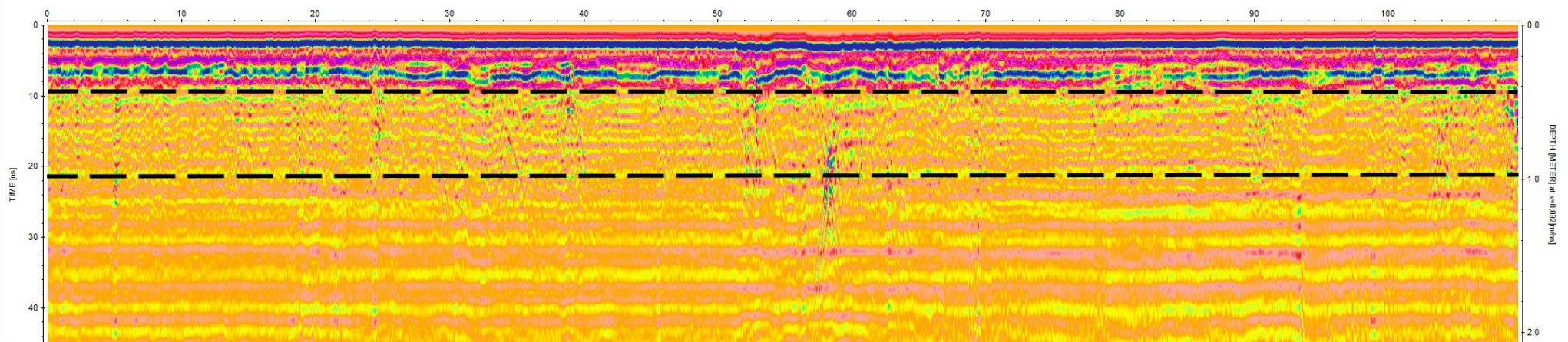


Figura 42: Exemple de diferents comportaments dels reflectors. Entre la línia discontinua és pot observar un nivell amb un comportament més caòtic dels reflectors.

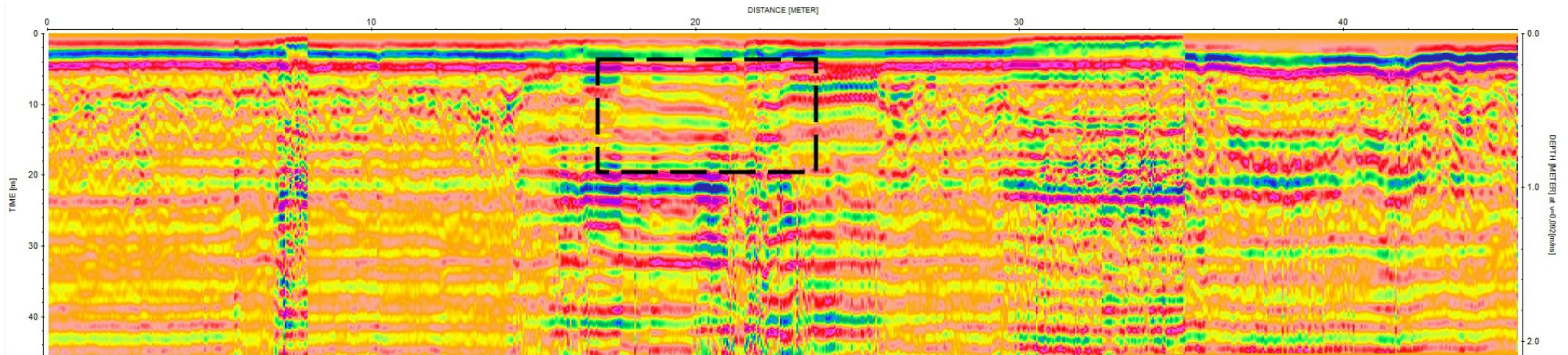


Figura 43: Exemple de col·lapse localitzat en el perfil longitudinal 15.

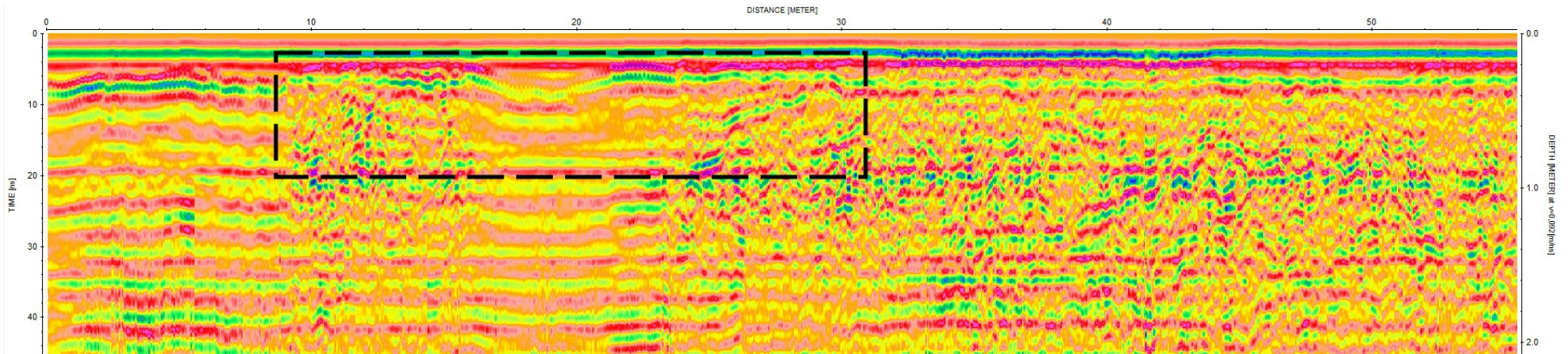


Figura 44: Exemple de col·lapse localitzat en el perfil longitudinal 25.

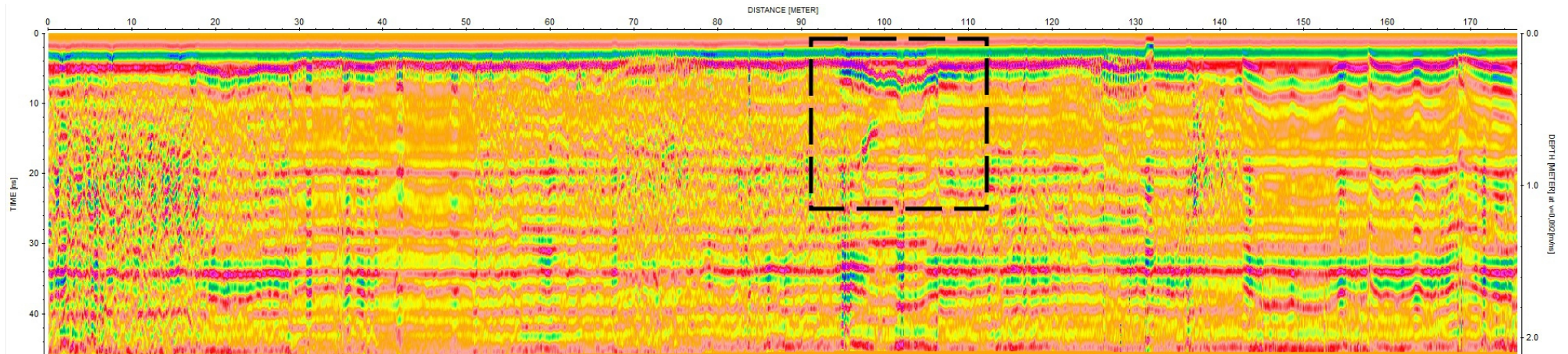


Figura 45: Exemple col·lapse localitzat en el perfil longitudinal 26.

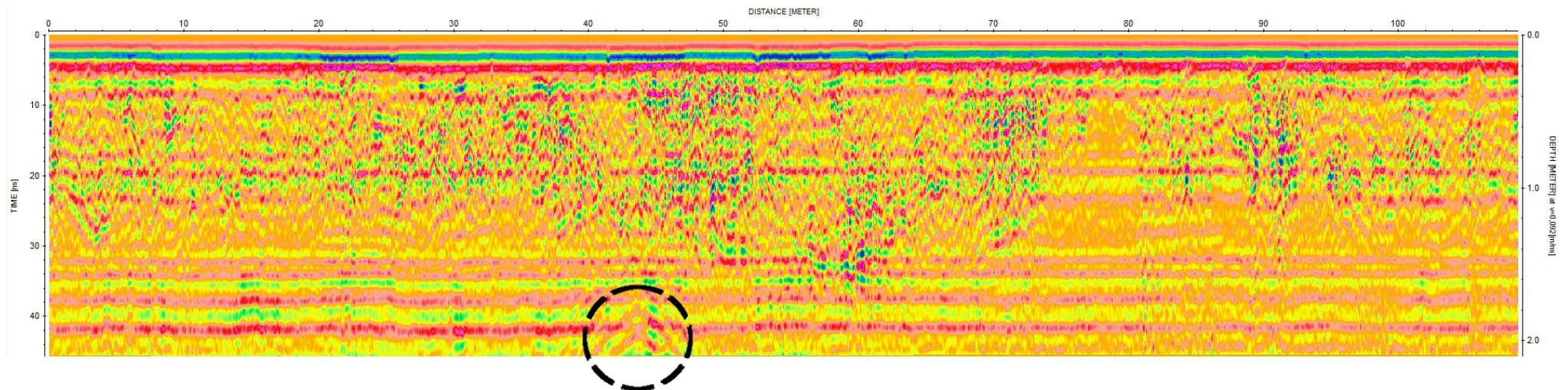


Figura 46: Exemple de rebot aeri produït en passar per sota d'un pont en el perfil longitudinal 21.

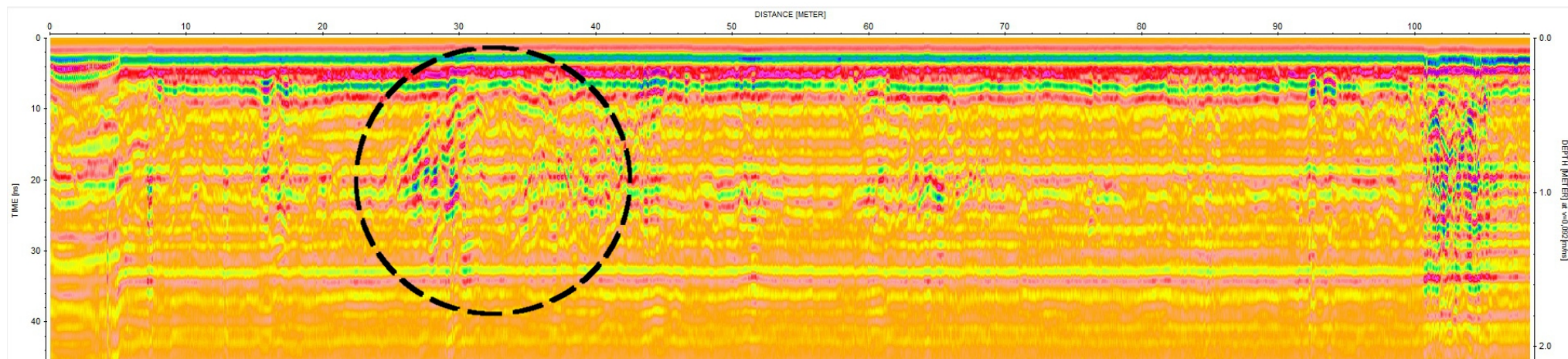


Figura 47: Exemple d'una hipèrbola de difracció sense interpretar.

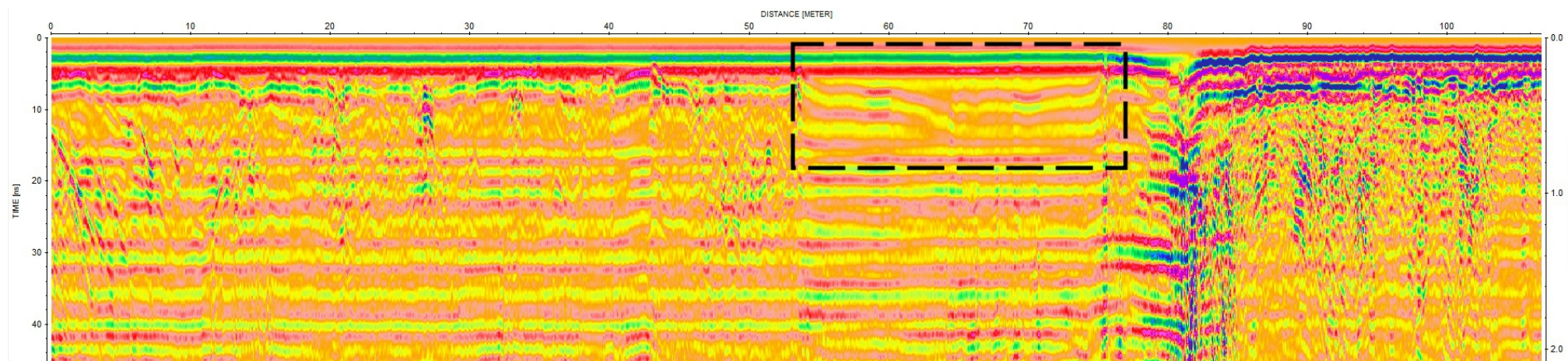


Figura 48: Comportament anòmal dels reflectors. S'hi percep un canvi del tipus de fàcies.

El que si que queda ben determinat en els radargrames, tot i no ser objecte d'interès, és el gruix de la llosa de formigó de la solera del canal. Aquest oscil·la entre els 25 – 30 cm (Figura 49)

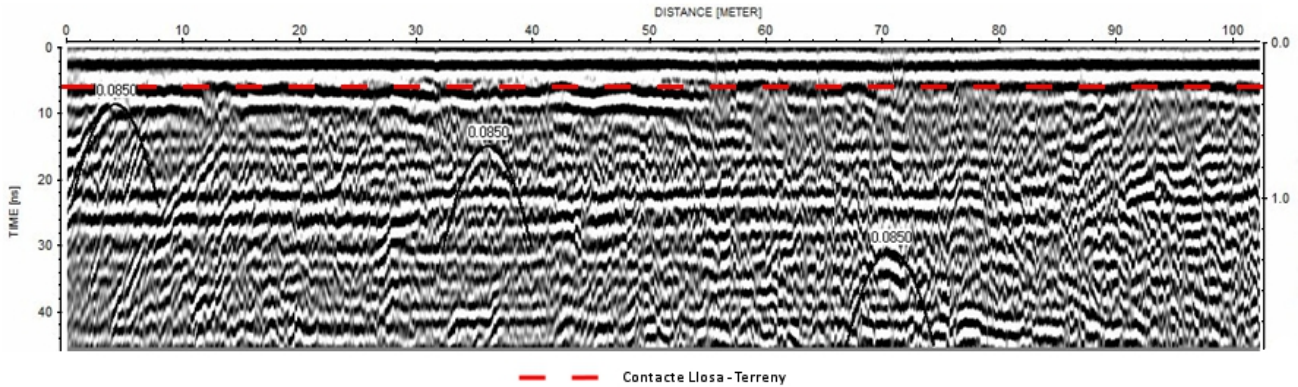


Figura 49: Contacte entre la llosa de formigó i el terreny natural (línia vermella discontinua)

En la següent taula s'hi poden veure les hipèrboles de difracció localitzades. En aquesta s'hi indica el nom del perfil, el nombre d'anomalies localitzades en cada un dels perfils i la posició (el PK més pròxim) de les anomalies en el canal. Com ja s'ha dit, la gran majoria de les hipèrboles de difracció localitzades eren degudes a còdols existents en la zona d'estudi.

PERFILS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	PROFUNDITAT (M)	MARGE
1	100	3	0.5+29.2	1.3	Esquerra
			0.5+63.8	0.6	Esquerra
			0.5+95.8	0.4	Esquerra
2	100	3	0.4+29.1	0.9	Esquerra
			0.4+49.8	0.9	Esquerra
			0.4+94.7	0.95	Esquerra
3	100	3	0.3+33.9	1	Esquerra
			0.3+59.2	0.3	Esquerra
			0.3+92.1	0.3	Esquerra
4	100	9	0.2+1	0.3	Esquerra
			0.2+22	0.5	Esquerra
			0.2+35	0.4	Esquerra
			0.2+38	0.4	Esquerra
			0.2+44.7	0.7	Esquerra

PERFILS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	PROFUNDITAT (M)	MARGE
4	100	9	0.2+71.8	0.5	Esquerra
			0.2+76	0.5	Esquerra
			0.2+90.8	0.55	Esquerra
			0.2+97.5	0.5	Esquerra
5	143.25	8	0.2-7.8	1	Esquerra
			0.2-14.3	0.3	Esquerra
			0.2-23	0.4	Esquerra
			0.2-41.4	1	Esquerra
			0.2-50.6	0.4	Esquerra
			0.2-53.7	0.3	Esquerra
			0.2-67.8	0.34	Esquerra
0.2-73.9	0.53	Esquerra			
6	142.5	12	0.1-46.7	1.3	Dret
			0.1-38.9	1	Dret
			0.1-36.7	1	Dret
			0.1-34	1	Dret
			0.1-20.2	0.6	Dret
			0.1-14.5	0.7	Dret
			0.1-12	1	Dret
			0.1+15.8	1.4	Dret
			0.1+19.4	1.1	Dret
			0.1+20.8	0.7	Dret
			0.1+24	0.6	Dret
0.1+34.6	0.4	Dret			
7	100	16	0.2+2	0.2	Dret
			0.2+11.4	0.5	Dret
			0.2+16.1	0.5	Dret
			0.2+21.7	0.8	Dret
			0.2+31.05	1	Dret
			0.2+32.6	0.6	Dret
			0.2+36.4	0.8	Dret
			0.2+38.2	0.8	Dret
			0.2+42.6	0.4	Dret
			0.2+51.4	0.53	Dret
			0.2+55.6	0.6	Dret
			0.2+66.7	0.4	Dret
			0.2+70.2	0.7	Dret
0.2+82.6	0.48	Dret			
0.2+83.6	0.8	Dret			

PERFIS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	PROFUNDITAT (M)	MARGE
			0.3	0.9	Dret
8	100	6	0.3+8.4	0.7	Dret
			0.3+25.4	0.7	Dret
			0.3+35.4	1	Dret
			0.3+36.9	0.8	Dret
			0.3+41.8	0.81	Dret
			0.3+52.45	1	Dret
9	100	7	0.4+6.5	1	Dret
			0.4+38	0.85	Dret
			0.4+39	0.71	Dret
			0.4+40	0.75	Dret
			0.4+64.8	0.65	Dret
			0.4+77.8	0.7	Dret
			0.4+97.5	0.71	Dret
10	100	10	0.5+12.3	1	Dret
			0.5+30.3	1	Dret
			0.5+40.5	0.8	Dret
			0.5+44.2	1.05	Dret
			0.5+46.3	1.05	Dret
			0.5+55.3	1	Dret
			0.5+60	0.6	Dret
			0.5+78.6	0.65	Dret
			0.5+87.3	0.72	Dret
			0.5+94.3	1	Dret
11	100	7	0.6+12.45	0.9	Dret
			0.6+14.7	0.7	Dret
			0.6+17.5	0.6	Dret
			0.6+26.7	0.5	Dret
			0.6+46.3	0.45	Dret
			0.6+51.8	0.7	Dret
			0.6+99.5	1.4	Dret
12	100	3	0.7+38.8	0.4	Dret
			0.7+58.5	0.6	Dret
			0.7+91	0.6	Dret
13	32	3	0.8+2.25	0.6	Dret
			0.8+3.48	0.7	Dret
			0.8+5.6	0.6	Dret
14	82.5	4	0.9+41.5	0.45	Dret
			0.9+43.1	1	Dret
			0.9+49.5	0.6	Dret

PERFILS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	PROFUNDITAT (M)	MARGE
			0.9+53.5	0.7	Dret
15	45.5	1	1.0+44.8	0.4	Dret
16	52.7	3	1.1-42.9	0.55	Dret
			1.1-35.9	0.75	Dret
			1.1-9.2	1.2	Dret
17	100	8	1.1+6.2	0.7	Dret
			1.1+46.4	1	Dret
			1.1+53.12	1	Dret
			1.1+62.5	1.2	Dret
			1.1+68.3	1	Dret
			1.1+85.3	0.7	Dret
			1.1+93	0.6	Dret
			1.1+98.2	1.2	Dret
18	125	6	1.2-45.8	0.7	Esquerra
			1.2-49.6	0.8	Esquerra
			1.2-62.2	0.6	Esquerra
			1.1-17.5	0.6	Esquerra
			1.1-17.7	1	Esquerra
			1.1-22.7	0.4	Esquerra
19	100	9	1.2+1.2	1	Dret
			1.2+7.4	1	Dret
			1.2+14.4	0.9	Dret
			1.2+18.8	0.7	Dret
			1.2+26.8	0.7	Dret
			1.2+50	0.7	Dret
			1.2+70	0.7	Dret
			1.2+77	0.5	Dret
1.2+89	0.6	Dret			
20	100	5	1.3+2.9	1	Dret
			1.3+11.4	1	Dret
			1.3+23.6	1	Dret
			1.3+35.2	0.6	Dret
			1.3+82.5	0.7	Dret
21	100	8	1.4+1.45	0.5	Dret
			1.4+10.6	1.16	Dret
			1.4+27.1	0.8	Dret
			1.4+37.8	0.7	Dret
			1.4+43.78	1.9	Dret
			1.4+47.8	0.5	Dret
			1.4+91.5	0.4	Dret

PERFILS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	PROFUNDITAT (M)	MARGE
			1.4+94.7	0.8	Dret
22	100	9	1.5+1.26	0.5	Dret
			1.5+21.6	0.62	Dret
			1.5+25.68	0.55	Dret
			1.5+30.45	0.7	Dret
			1.5+36.4	0.6	Dret
			1.5+41.65	0.7	Dret
			1.5+56	0.7	Dret
			1.5+84.1	0.8	Dret
			1.5+98.3	0.8	Dret
23	17.67	4	1.6+2.34	0.6	Dret
			1.6+8.10	0.7	Dret
			1.6+9.3	1.3	Dret
			1.6+16.7	0.6	Dret
24	84.5	0			Dret
25	55.4	2	1.8-12	1.2	Dret
			1.8-5.3	1.25	Dret
26	175.5	5	1.8+12.7	1	Dret
			1.8+15.8	1.9	Dret
			1.8+65.6	0.9	Dret
			1.8+90	1.2	Dret
			1.9+36	0.75	Dret
27	92.2	6	2.1-88.3	0.45	Dret
			2.1-83.45	0.6	Dret
			2.1-67.9	1	Dret
			2.1-44.8	1	Dret
			2.1-31.8	0.7	Dret
			2.1-2.8	1.1	Dret
28	63.45	5	2.1+3.44	0.5	Dret
			2.1+8.51	0.4	Dret
			2.1+12.9	0.7	Dret
			2.1+36	1	Dret
			2.1+38.9	1.5	Dret
29	88.7	4	2.3-60.9	1	Dret
			2.3-54.4	1	Dret
			2.3-48	1.1	Dret
			2.3-36.4	1	Dret
30	36.5	3	2.3+1.4	0.6	Dret
			2.3+2.8	0.7	Dret
			2.3+34.1	0.4	Dret

PERFILS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	PROFUNDITAT (M)	MARGE
31	130.67	2	2.5-83.7	0.7	Dret
			2.5-81.7	0.4	Dret
32	100	1	2.5+13.1	0.7	Dret
33	100	0			Dret
34	100	5	2.7+8.56	0.4	Dret
			2.7+18	0.5	Dret
			2.7+58.6	0.7	Dret
			2.7+67.8	0.5	Dret
			2.7+72.5	1.8	Dret
35	142.5	6	2.8+12.6	1.25	Dret
			2.8+23.8	0.5	Dret
			2.8+70.3	0.55	Dret
			2.8+72.8	0.7	Dret
			2.8+83	0.5	Dret
			2.9+21.6	0.5	Dret

Taula 19: Perfils Longitudinals; Longitud, nº anomalies, PK, Profunditat i marge de cada perfil

3.5.4.2 PERFILS TRANSVERSALS

Els perfils transversals s'han realitzat en la solera del canal aproximadament cada 100 metres, al final de cada perfil longitudinal. La seva localització es pot consultar en l'Annex I.

Les anomalies localitzades en els perfils transversals es mostren en la següent taula.

PERFILS LONGITUDINALS					
PERFIL	LONGITUD (M)	Nº ANOMALIES	PK	DISTÀNCIA (M)	PROFUNDITAT (M)
1	3.3	0	0+500		
2	3.4	1	0+200	0.98	0.33
3	3.5	0	0+300		
4	3.6	0	0+400		
5	3.5	1	0+500	1.36	0.33
6	3.4	1	0+600	1.52	0.35
7	3.3	1	0+700	1.65	0.33
8	3.4	1	0+800	1.25	0.33
9	3.4	0	1+200		
10	3.1	2	1+300	0.7	0.7
				1.5	0.3
11	3.7	2	1+400	0.95	0.4
				1.85	0.5
12	3.5	1	1+500	1	0.3
13	3.8	1	1+600	1.55	0.33
14	3.6	1	1+840	1.6	0.44
15	3.6	1	2+100	1.6	0.35
16	2	1	2+300	1.1	0.35
17	1.9	1	2+500	1.2	0.33
18	2.7	0	2+600		
19	2.7	1	2+700	1.2	0.35
20	2.9	1	2+800	1.16	0.33

Taula 20: Perfils Transversals; Longitud, nº anomalies, PK, posició i profunditat de les anomalies.

S'hi s'observen els valors de la taula 20, és pot comprovar que en molts dels perfil transversals es presenta una anomalia que oscil·la entre 1metre i 1.5 metres des del inici del perfil i a una profunditat de 0.33 metres. Aquesta hipèrbola de difracció correspon a una canonada (figura 50) que recorre tot el canal. En alguns dels perfil, s'hi pot veure una segona hipèrbola a una profunditat exactament el doble de l'anterior, fet que indica que es tracta d'un múltiple de la primera hipèrbola.

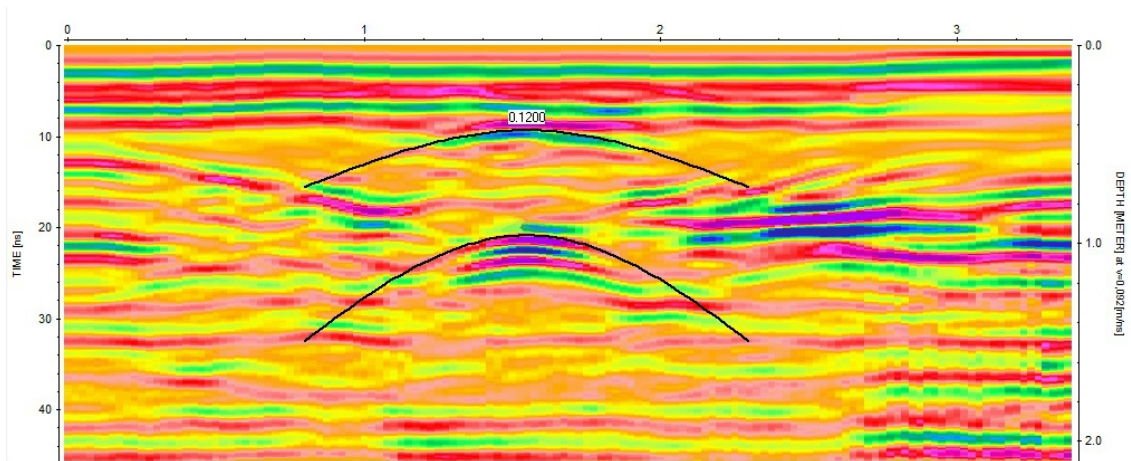


Figura 50: Exemple del comportament dels reflectors sobre una canonada. Perfil transversal 6.

En la figura 51, Perfil 11 transversal, s'hi observa una segona hipèrbola de difracció situada a 1.85 metres des del inici del perfil i a una profunditat de 0.5 metres. Aquesta segona hipèrbola correspon a una segona canonada.

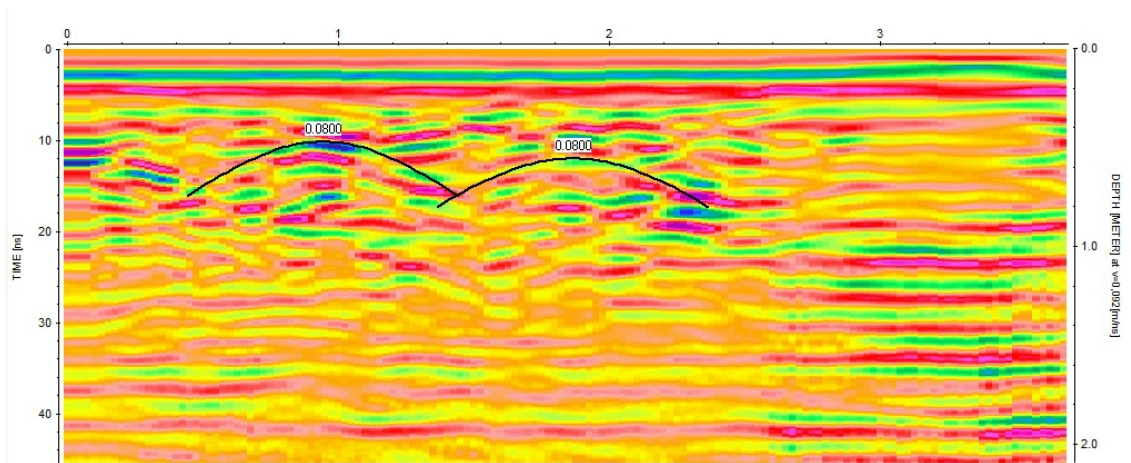


Figura 51: Exemple del comportament dels reflectors sobre dues canonades. Perfil transversal 11.

El Perfil 10 presenta a més d'una hipèrbola de difracció situada a 0.7 metres des del inici del perfil i a una profunditat de 0.7 metres, que es podria associar a una de les canonades identificades en anteriors perfils, però que degut a la profunditat a la que es troba, no es pot afirmar, una zona marcada en la figura 52 amb un requadre negre, que podria tractar-se d'una zona col·lapsada. Es recomana fer assaig de control en aquest punt en les dues anomalies.

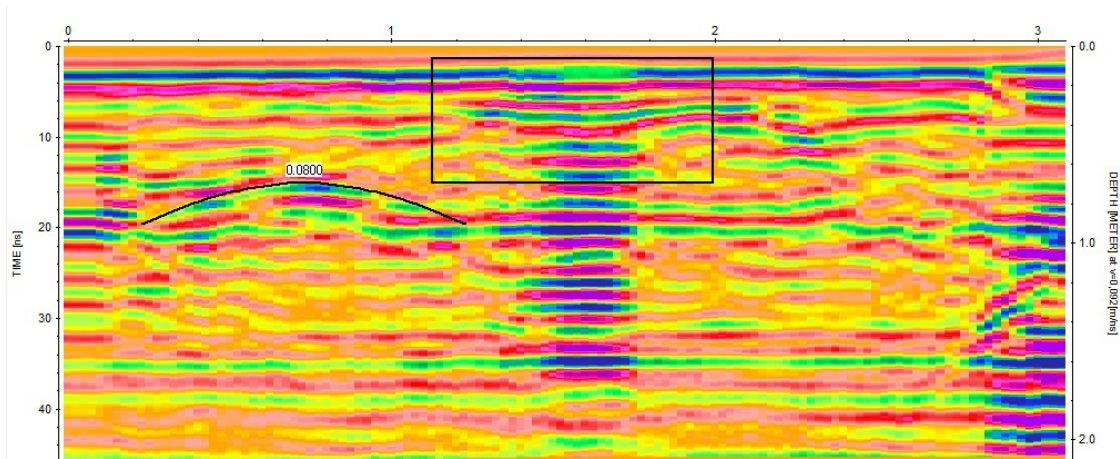


Figura 52: Perfil 10 transversal. Localització d'una hipèrbola de difracció i d'una zona col·lapsada (requadre en negre).

Igual que en els perfils longitudinals, en els perfils transversal també s'han detectat aquelles zones de la solera del canal en les que ja s'havien aplicat mesures correctores com ara un reforç de la llosa de formigó amb armadura (figura 46).

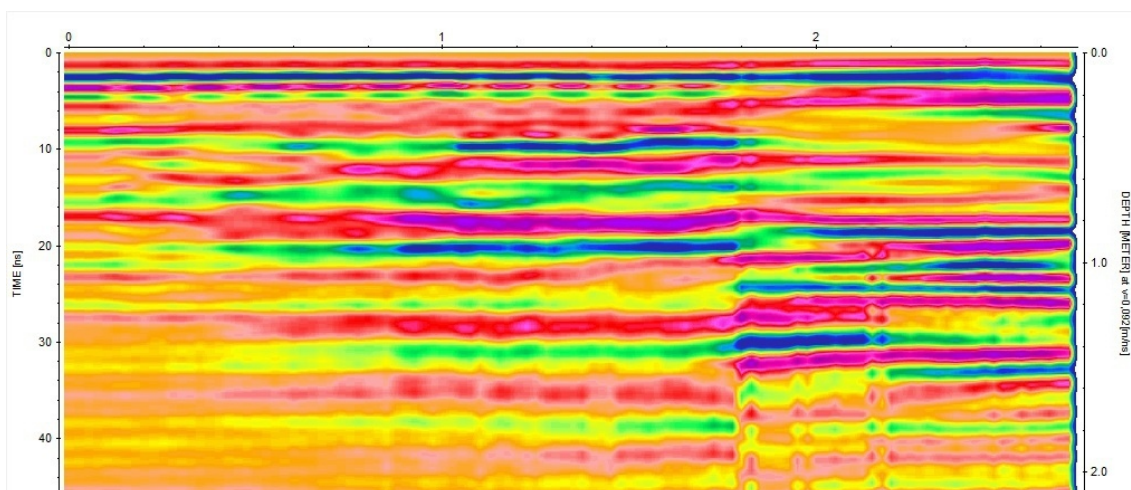


Figura 53: Exemple del comportament del reflectors al trobar-se amb una llosa de formigó armat. Perfil transversal 18.

CAPÍTOL 4. CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

4.1 CONCLUSIONS

Un cop realitzat l'estudi les conclusions que es poden extreure són:

- Especialment la tomografia elèctrica, i en menor mesura el geo-radar, han mostrat la distribució existent a sota del terreny de la zona d'estudi.
- La tomografia ha permès localitzar varies anomalies podent-ne distingir de dos tipus: anomalies de caràcter conductiu, que corresponen a zones de material de gra fi, i per tant, susceptibles de patir un rentat de fins i filtracions i anomalies de caràcter resistiu, que poden ser causades per cavitats, nuclis rocosos i antigues injeccions de formigó o ciment.
- De totes les anomalies de caràcter resistiu s'han considerat aquelles amb valors de resistivitat superiors a 1200 ohm·m i que es trobaven de manera aïllada, com a anomalies causades per cavitats. Aquestes s'han detectat en el primer tram, exactament en el Perfil 1 Dret. En la resta dels trams no hi ha hagut evidències de l'existència de cavitats.
- S'han detectat nivells molt resistius amb nuclis d'elevada resistivitat, segurament corresponents a antigues injeccions de formigó o ciment en el perfil 5 Esquerre i 6 Esquerre.
- El geo-radar ha permès localitzar nombroses hipèrboles de difracció, la gran majoria a una profunditat inferior a 1 metre generades per còdols i irregularitats del subsòl
- El geo-radar no ha permès localitzar cavitats i filtracions d'aigua però sí zones col·lapsades.
- El geo-radar ha permès localitzar amb claredat la situació d'algunes canonades de servei així com determinar el gruix de les lloses de formigó de la solera del canal i identificar els trams de la solera que ja havien estat reparats mitjançant la col·locació d'armadura.

4.2 RECOMANACIONS

Es recomana la realització de sondejos mecànics en aquelles zones on s'han localitzat anomalies de caràcter resistiu per determinar si es tracta de nuclis rocosos o de cavitats. En cas que es tracti de cavitats, fer injeccions de formigó per tal d'assegurar l'estabilitat de la zona afectada.

També es recomana la realització de sondejos mecànics en aquelles zones on s'han localitzat anomalies de caràcter conductiu per conèixer la naturalesa del material i descartar que es tracti de filtracions d'aigua. En cas que es tracti de material tou, és recomana injectar la zona. En l'Annex II estan representades aquelles zones on es recomanen els sondejos.

Respecte als resultats obtinguts amb GPR, és convenient fer un seguiment de les zones on s'han detectat petits col·lapses per sota de la llosa de formigó, així com d'aquells punts on s'han detectats comportaments anòmals i no s'ha pogut associar a cap estructura. La seva localització és pot consultar en l'Annex II. Es recomana la realització d'altres assaigs de control sobretot en el cas que s'observin evidències de soscavament.

Es recomana, en un futur, realitzar una altra exploració geofísica amb ERT en les zones que han estat tractades, per tal de monitoritzar l'efectivitat de les mesures de correcció aplicades, les injeccions.

Tanmateix, és d'interès conservar els resultats obtinguts per a posteriors campanyes de manteniment del canal.

BIBLIOGRAFIA

- CRUSAFONT, M., RIBA, O., & VILLENA, J. (1966). *Nota preliminar sobre un yacimiento de vertebrados aquitanienses en Santa Cilia (río Formiga, provincia de Huesca) y sus consecuencias geológicas* (Vol. 83). I.G.M.E.
- DAHLIN, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27, 1019-1029.
- DEGROOT-HEDLIN, C., & CONSTABLE, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- EDMINISTER, J. (1981). *Electromagnetismo*. MacGraw-Hill.
- EDWARDS, L. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics* (42), 1020 - 1036.
- GARRIDO, A. (1973). *Estudio geológico y relación entre tectónica y sedimentación del secundario y terciario de la vertiente meridional pirenaica en la zona central (Provincias de Huesca y Lérida)*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- GEOTOMO SOFTWARE. (sense data). *Manual d'instruccions del program Res2DINV. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion*. Consultat el 11 / Juliol / 2011, a <http://www.geoelectrical.com>
- GRIFFITHS, D., & BARKER, R. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- GSSI. Consultat el 17 / Octubre / 2011, a Product GSSI: Antennas: <http://www.geophysical.com/antennas.htm>
- HOLUB, P., & DUMITRSCU, T. (1994). Détection des cavités à l'aide de mesures électriques et du géoradar dans une galerie d'amenée d'eau. *Journal of Applied Geophysics*, 31, 185-195.
- I.G.M.E. (1998). *Mapa geológico de España. Escala 1:50.000* (Segona sèrie. Primera edició ed., Vol. Full 359: Balaguer). Madrid: Instituto tecnologico geominero de España.
- JOHNSON, R., GLACCUM, R., & WOJTASINSKI, R. (1979). Application of ground penetrating radar to soil survey. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* (39), 68 - 72.
- LARRAGAN. (1949). *Mapa geológico de España*.

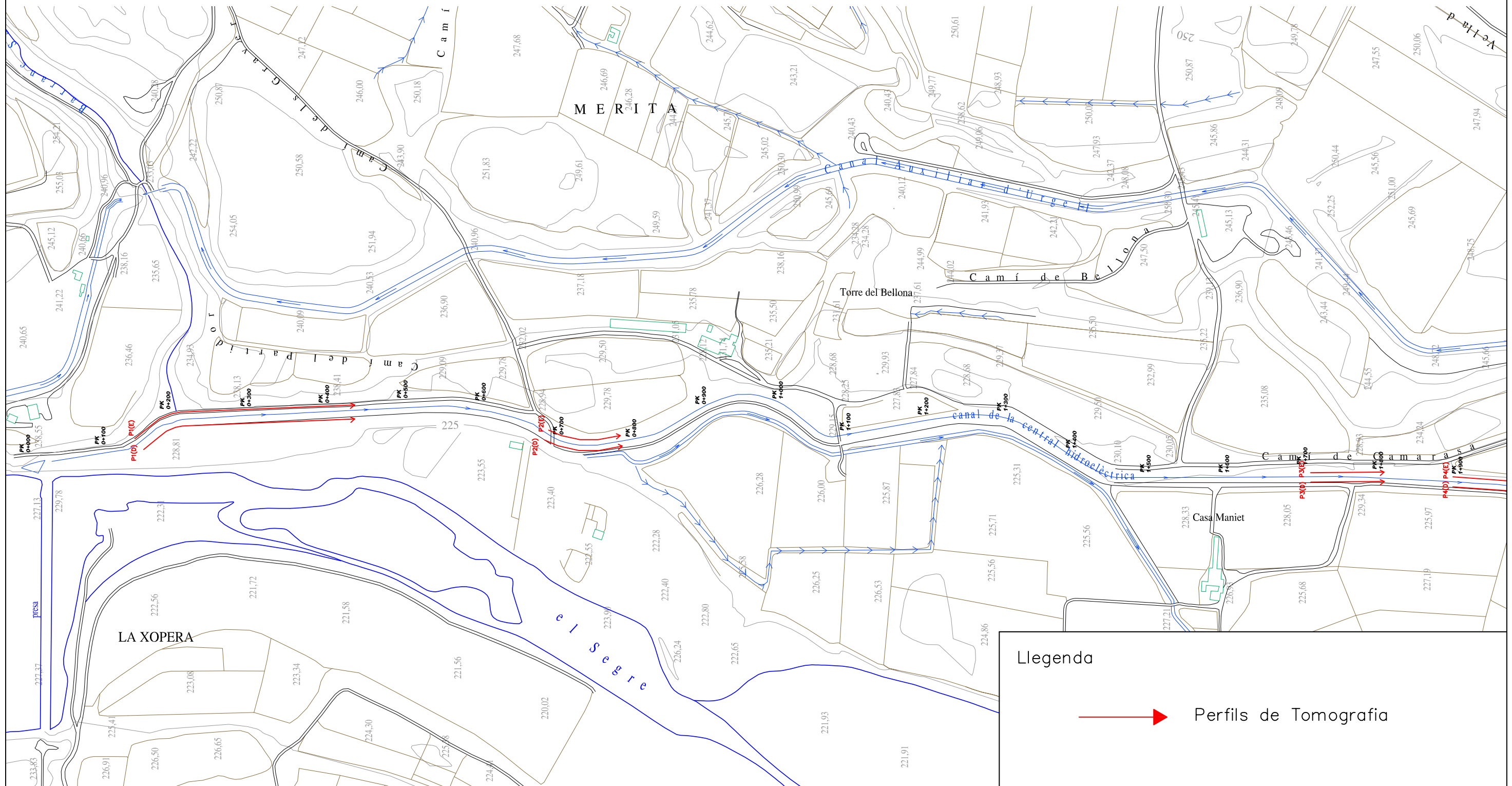
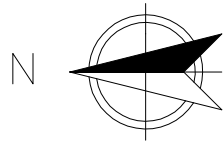
- LOKE, M. (2004). *Bidimensional and Tridimensional Electrical Imaging Surveys*.
- LOKE, M. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys*.
- LOKE, M. (1996-2011). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Consultat el 11 / Juliol / 2011, a <http://www.goelectrical.com>
- LOKE, M., & BARKER, R. (1996b). Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosection by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- LOKE, M., & DAHLIN, T. (2002). A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 149-162.
- LÓPEZ HIDALGO, A., LOKE, M., FANTON, G., & CARA RUBÍ, E. (2004). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D). *Geoelectrical* .
- MCCANN, D., JACKSON, P., & FENNING, P. (1988). Comparison of the seismic and ground-probing radar methods in geological surveying. *IEE Proceedings* (135), 380-390.
- MOREY, M. (1974). Continuous sub-surface profiling by impulse radar In: *Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction. ASCE Specialty Conference*, (p. 213-232). Henneker.
- OLAYINKA, A. (2000). Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity sata and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 45, 63-81.
- PAZDIREK, O., & BLAHA, V. (1996). Examples of resistivity imaging using ME-100 resistivity field acquisition system. *EAGE 58th Conference and technical Exhibition*. Amsterdam.
- QUIRANTES, J. (1969, publicat 1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros*. Granada, Diputación Provincial de Zaragoza: Tesis doctoral. Universitat de Granada. Institució "Fernando El Católico "(CSIC).
- REYNOLDS, J. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. England: Wiley.
- SÁEZ, A. (1987). *Estratigrafía y sedimentología de las formaciones lacustres del tránsito Eoceno-Oligoceno del NE de la Cuenca del Ebro*. Barcelona: Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.

SASAKI, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.

TELFORD, W., GELDART, L., & SHERIFF, R. (1990). *Applied Geophysics* (2nd Edition ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

ULRIKSEN, C. (1982). *Application of impulse radar to civil engineering*. Tesis doctoral del departament d'Enginyeria Geològica, Lund University of Technology, Suècia.

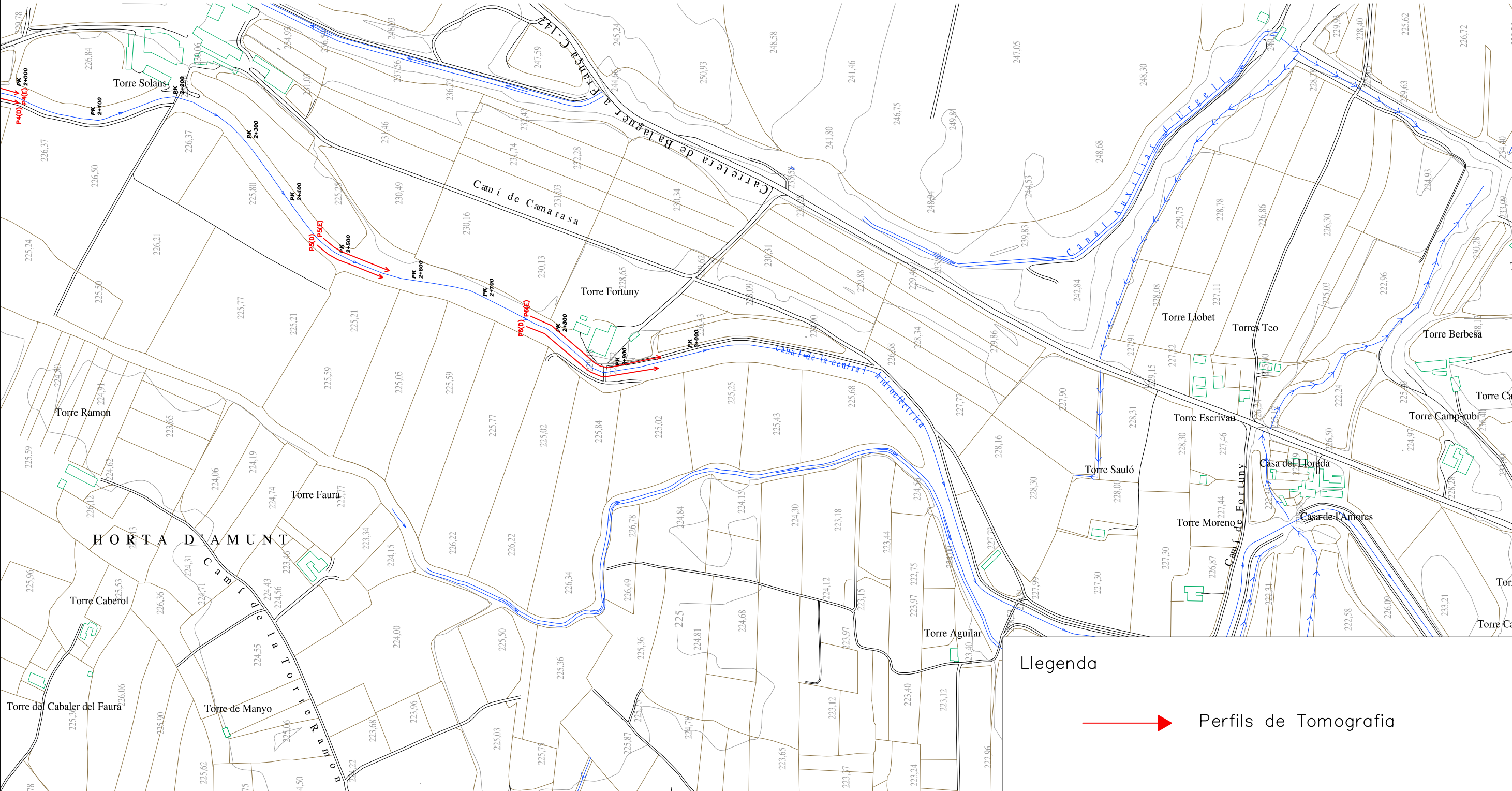
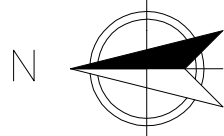
ANNEX I: PLANTA DE SITUACIONS DELS PERFILS DE ERT I GPR



Llegenda

→ Perfils de Tomografia

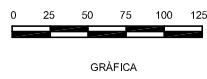
TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 <small>ORIGINALS LINEA3</small> NUMÉRICA <small>GRÀFICA</small>	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ PERFILS ERT	Nº. PLANOL: 1 <small>FULL: 1 de 2</small>
---	---------------------------------------	--	------------------------------	--	---



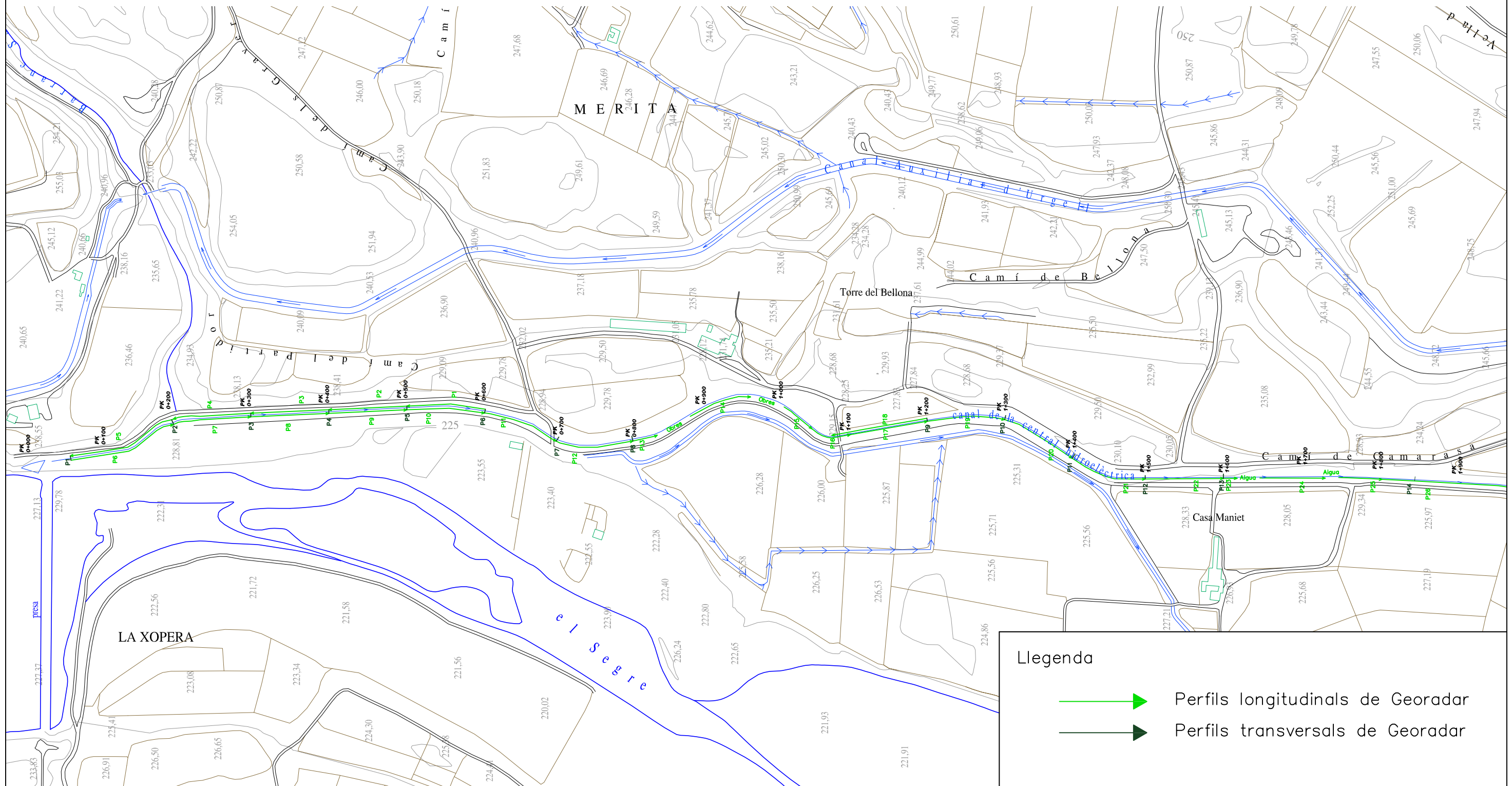
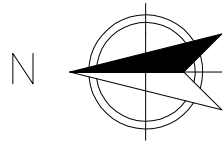
Llegenda

→ Perfils de Tomografia

TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 NUMÈRICA	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ PERFILS ERT	Nº. PLANOL: 1
---	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------	--	-------------------------



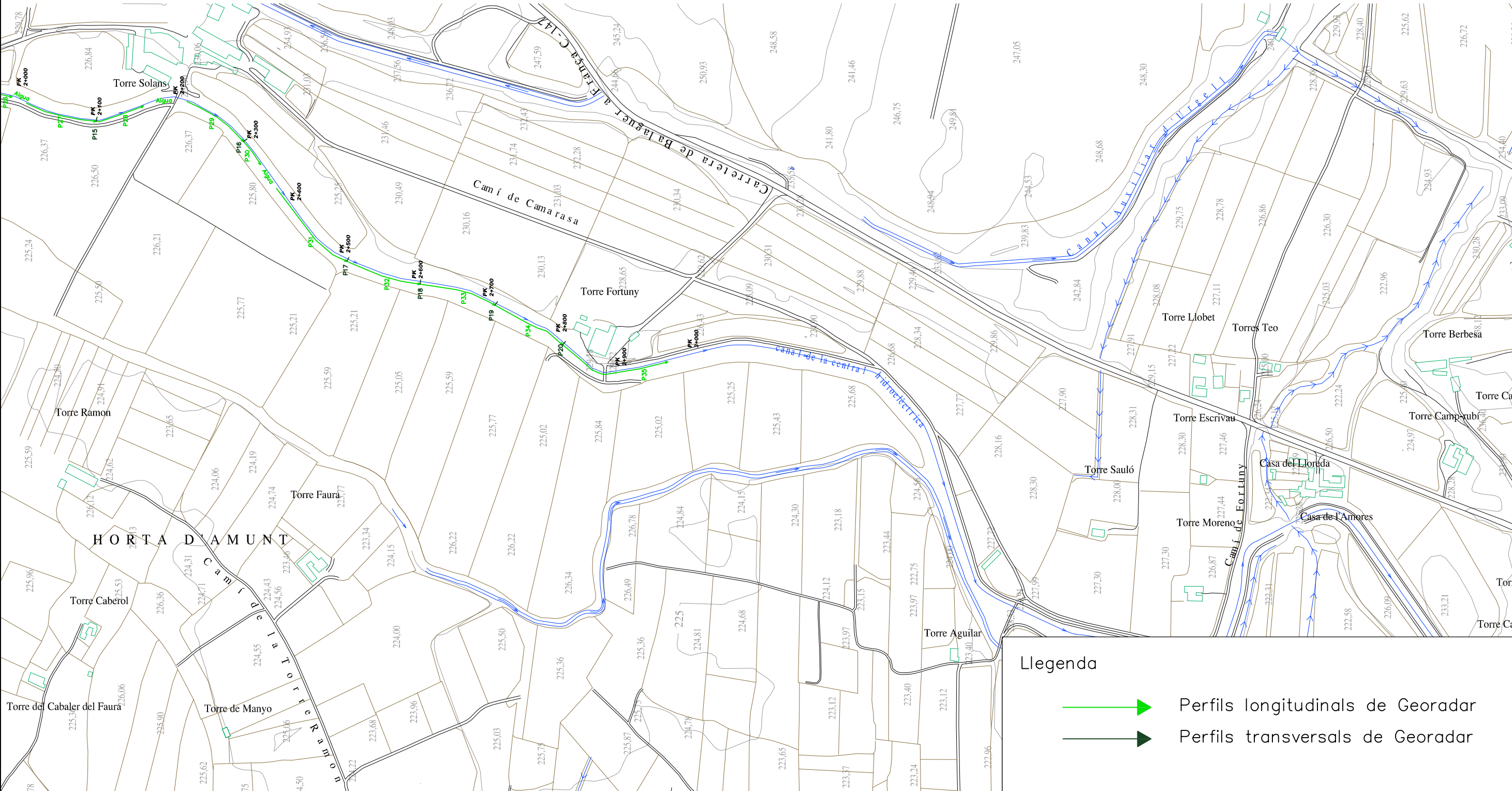
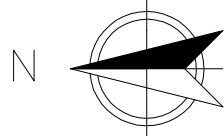
FULL: 2 de 2



Llegenda

- Perfils longitudinals de Georadar
- Perfils transversals de Georadar

TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 <small>NUMÉRICA</small>	 <small>GRÀFICA</small>	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ PERFILS GPR	Nº. PLANOL: 2
						<small>FULL: 1 de 2</small>

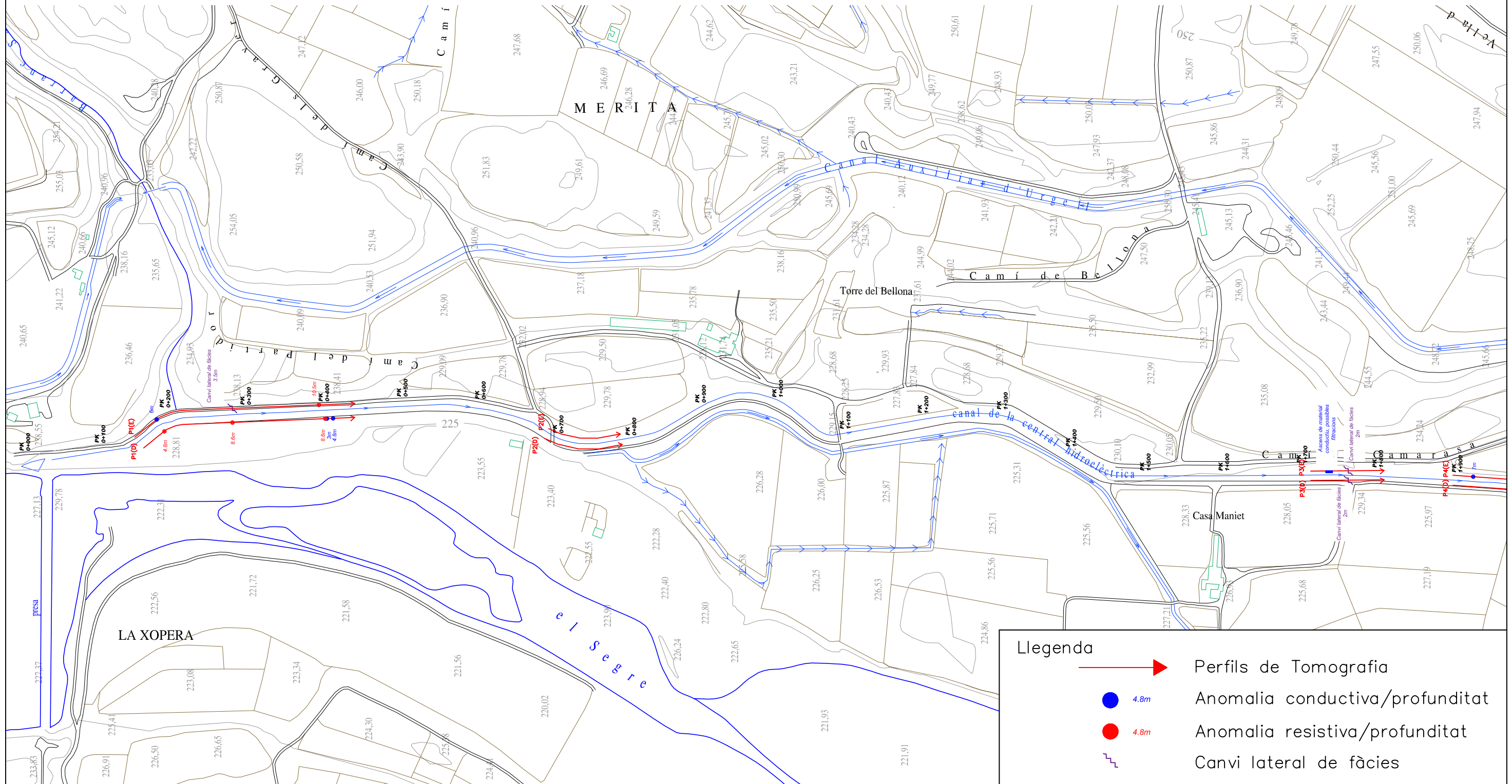
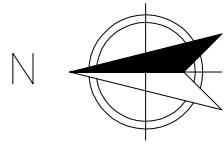


Llegenda

- Perfils longitudinals de Georadar
- Perfils transversals de Georadar

TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 <small>NUMÉRICA</small>	 <small>GRÀFICA</small>	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ PERFILS GPR	Nº. PLANOL: 2
						<small>FULL: 2 de 2</small>

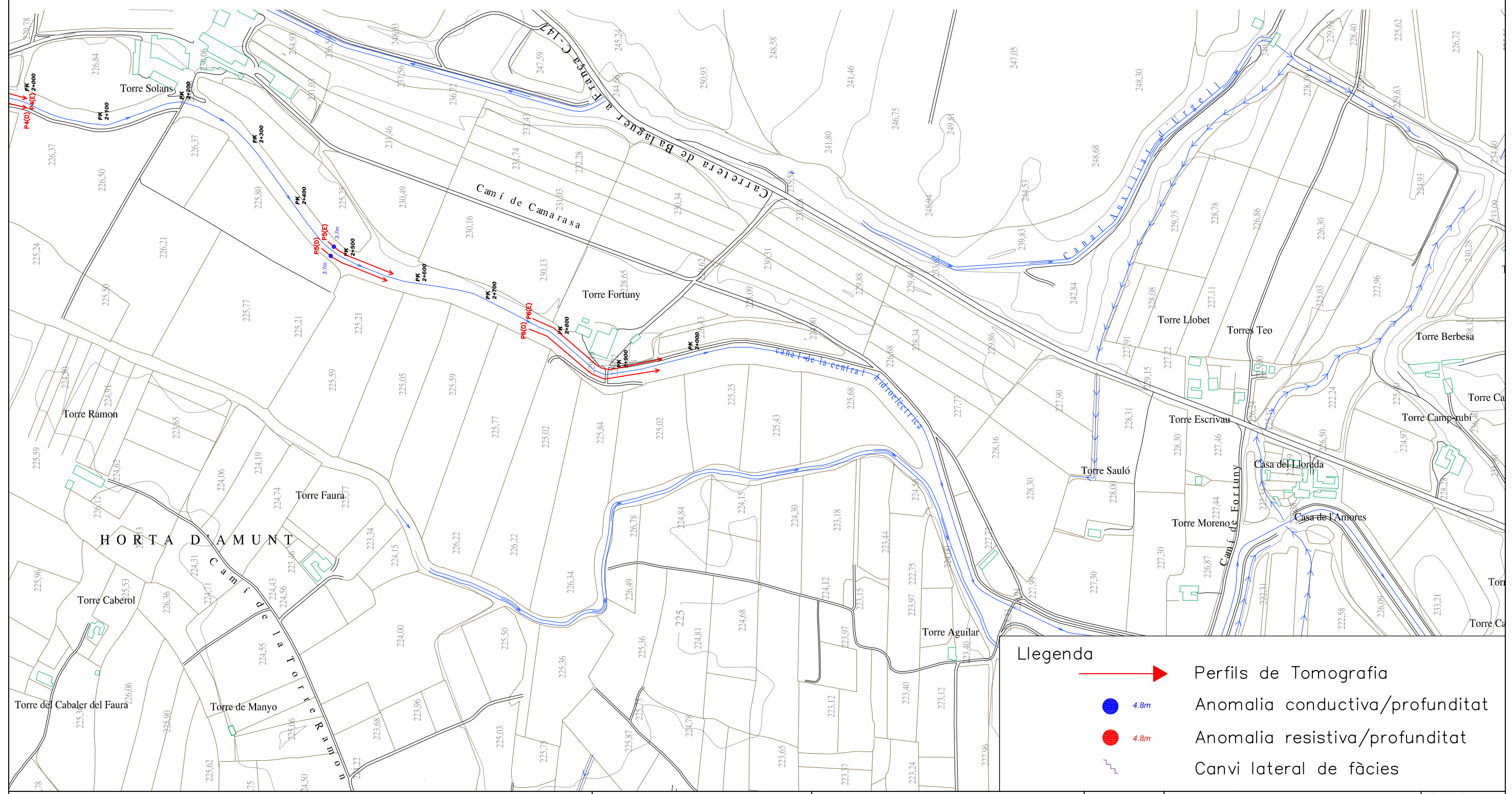
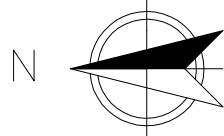
ANNEX II: PLANTA DE SITUACIONS DE LES ANOMALIES DE ERT I GPR



Llegenda

- Perfils de Tomografia
- 4.8m Anomalia conductiva/profunditat
- 4.8m Anomalia resistiva/profunditat
- Canvi lateral de fàcies

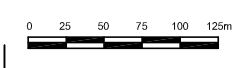
TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 ORIGINALS LINEA3 NUMÉRICA GRÀFICA	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ ANOMALIES ERT	Nº. PLANOL: 3
					FULL: 1 de 2

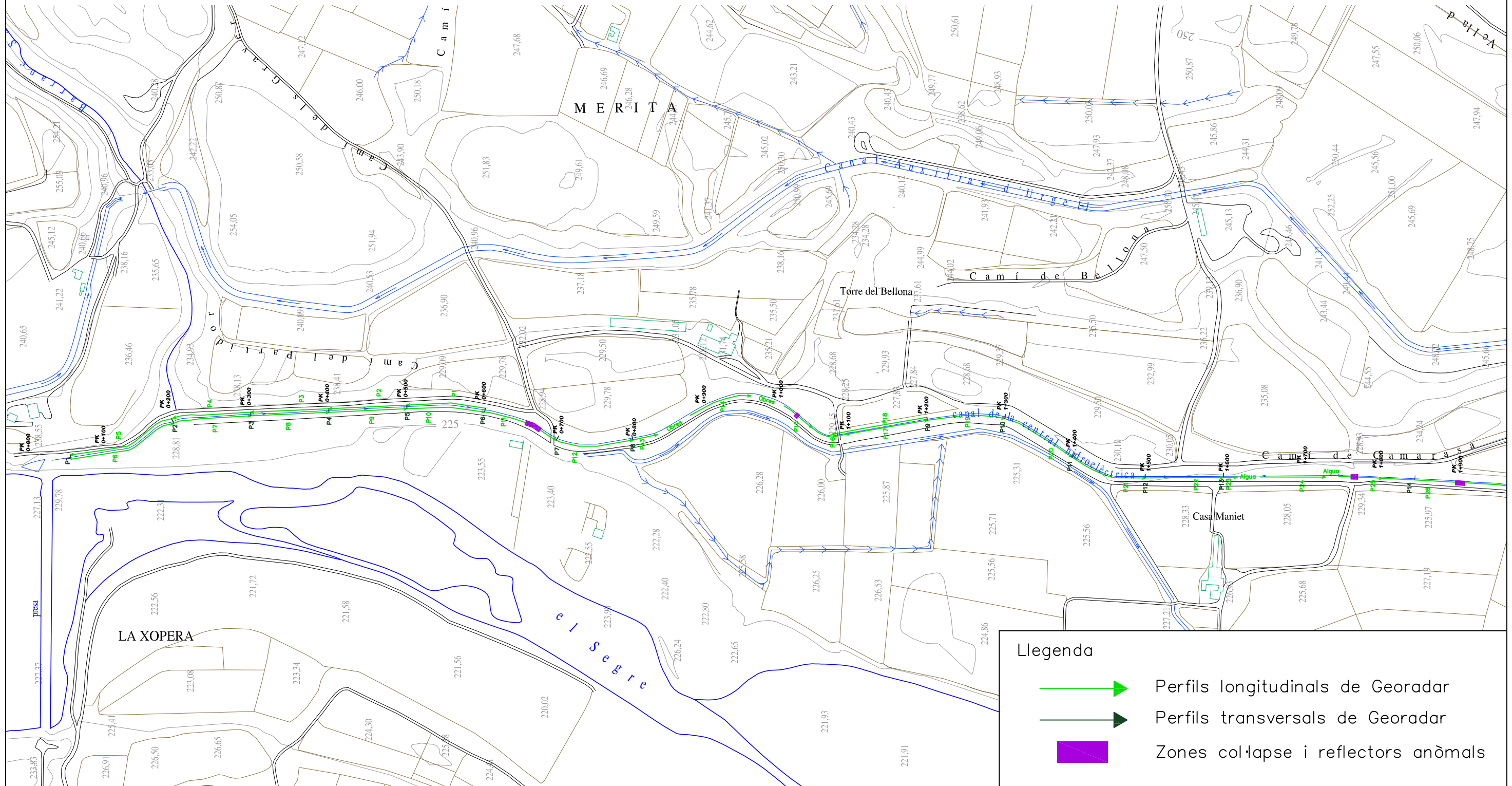
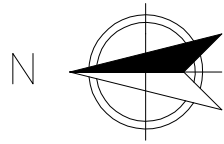


Llegenda

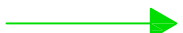


- Perfils de Tomografia
- 4.8m Anomalia conductiva/profunditat
- 4.8m Anomalia resistiva/profunditat
- Canvi lateral de fàcies

TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 <small>ORIGINALS LINEAS</small> NUMÉRICA GRÀFICA
DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ ANOMALIES ERT	Nº. PLANOL: 3 <small>FULL: 2 de 2</small>

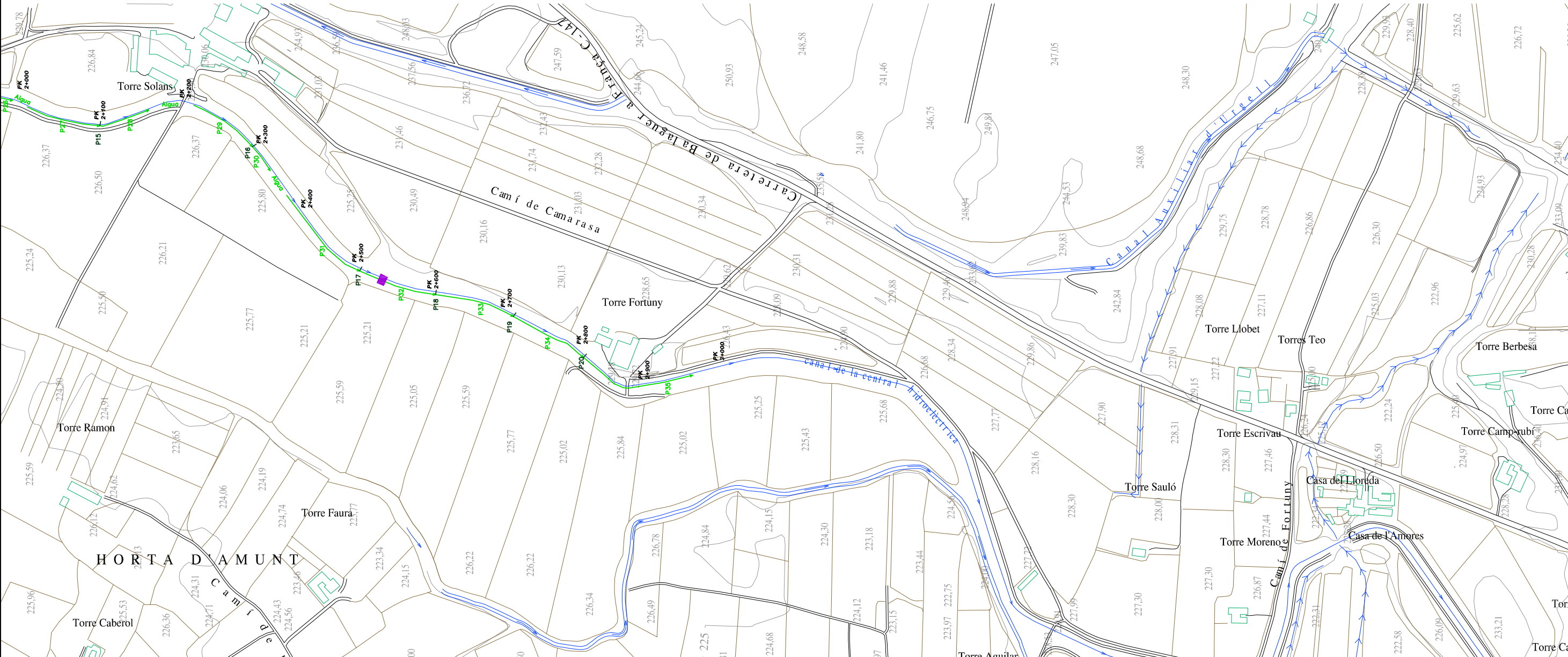
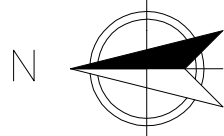




Llegenda

-  Perfils longitudinals de Georadar
-  Perfils transversals de Georadar
-  Zones col·lapse i reflectors anòmals

TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 <small>ORIGINALS LINEA3</small> <small>NUMÉRICA</small>	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ ANOMALIES GPR	Nº. PLANOL: 4 FULL: 1 de 2
---	---------------------------------------	---	------------------------------	--	--



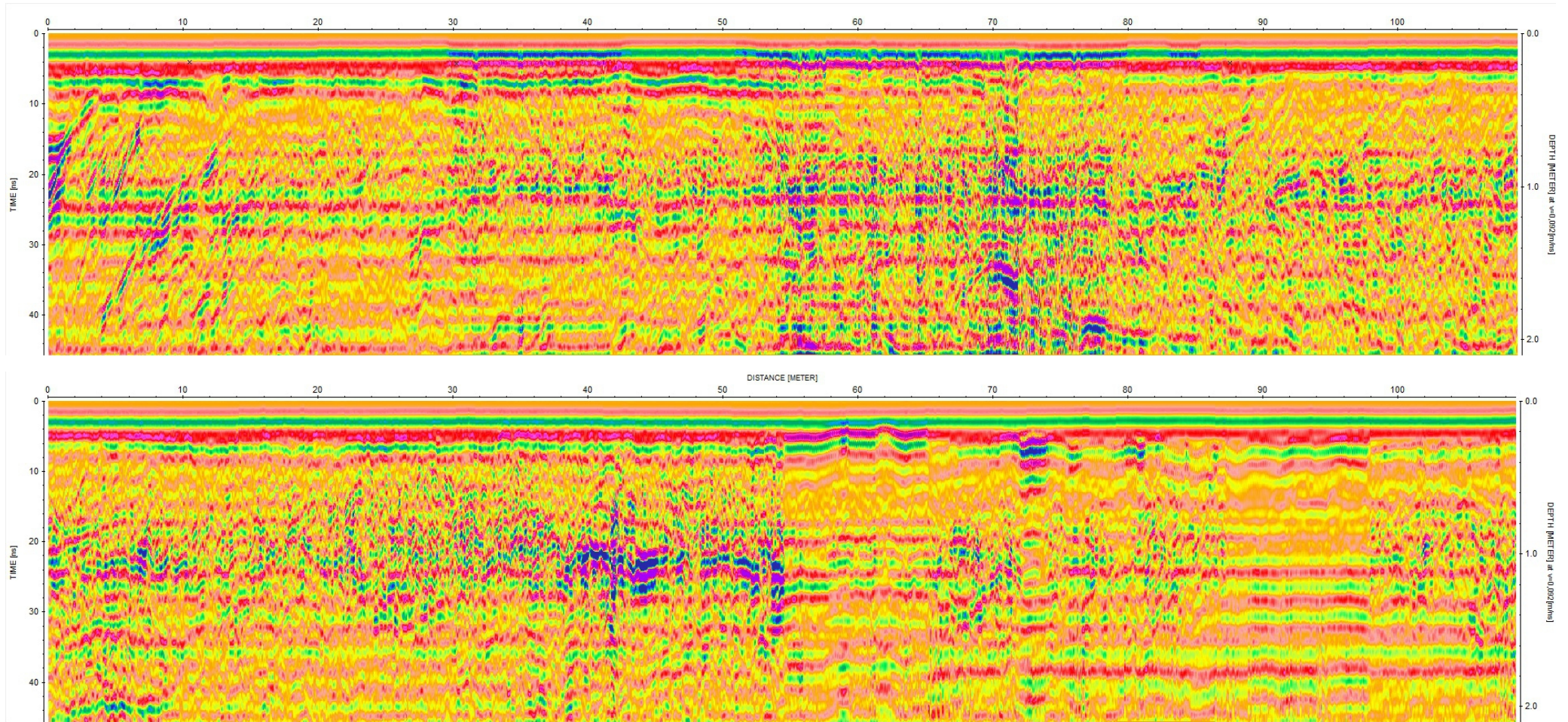
Llegenda

- Perfils longitudinals de Georadar
- Perfils transversals de Georadar
- Zones col·lapse i reflectors anòmals

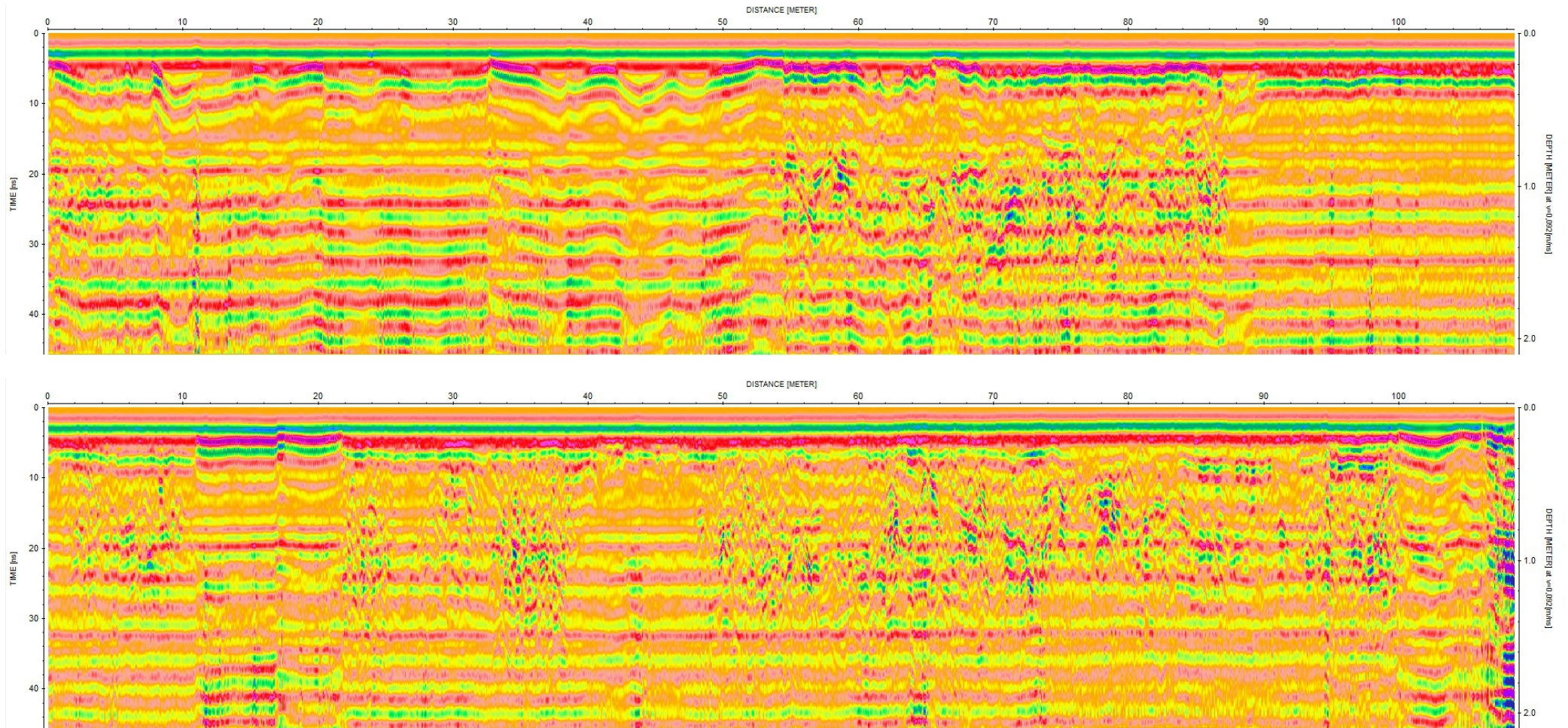
TÍTOL: EINES DE PROSPECCIÓ GEOFÍSICA APLICADES A L'ESTUDI DELS PROBLEMES ASSOCIATS A UNA CANALITZACIÓ	AUTOR: ALBA BOSCH I TEIXIDÓ	ESCALES: 1:5000 <small>NUMÉRICA</small>	 <small>GRÀFICA</small>	DATA: OCTUBRE 2011	TÍTOL DEL PLANOL: SITUACIÓ ANOMALIES GPR	Nº. PLANOL: 4 <small>FULL: 2 de 2</small>
---	---------------------------------------	--	----------------------------	------------------------------	--	---

ANNEX III: RADARGRAMS

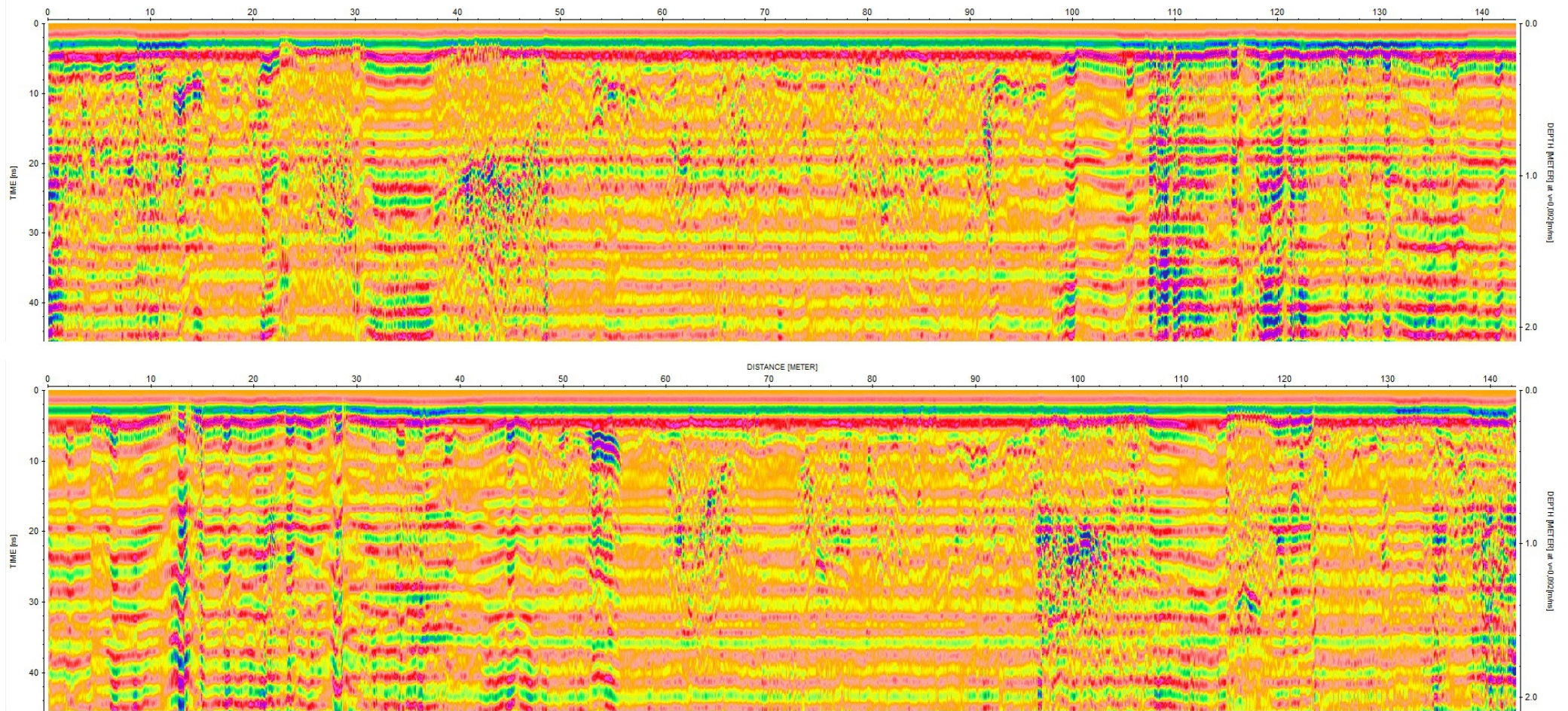
PERFILS LONGITUDINALS



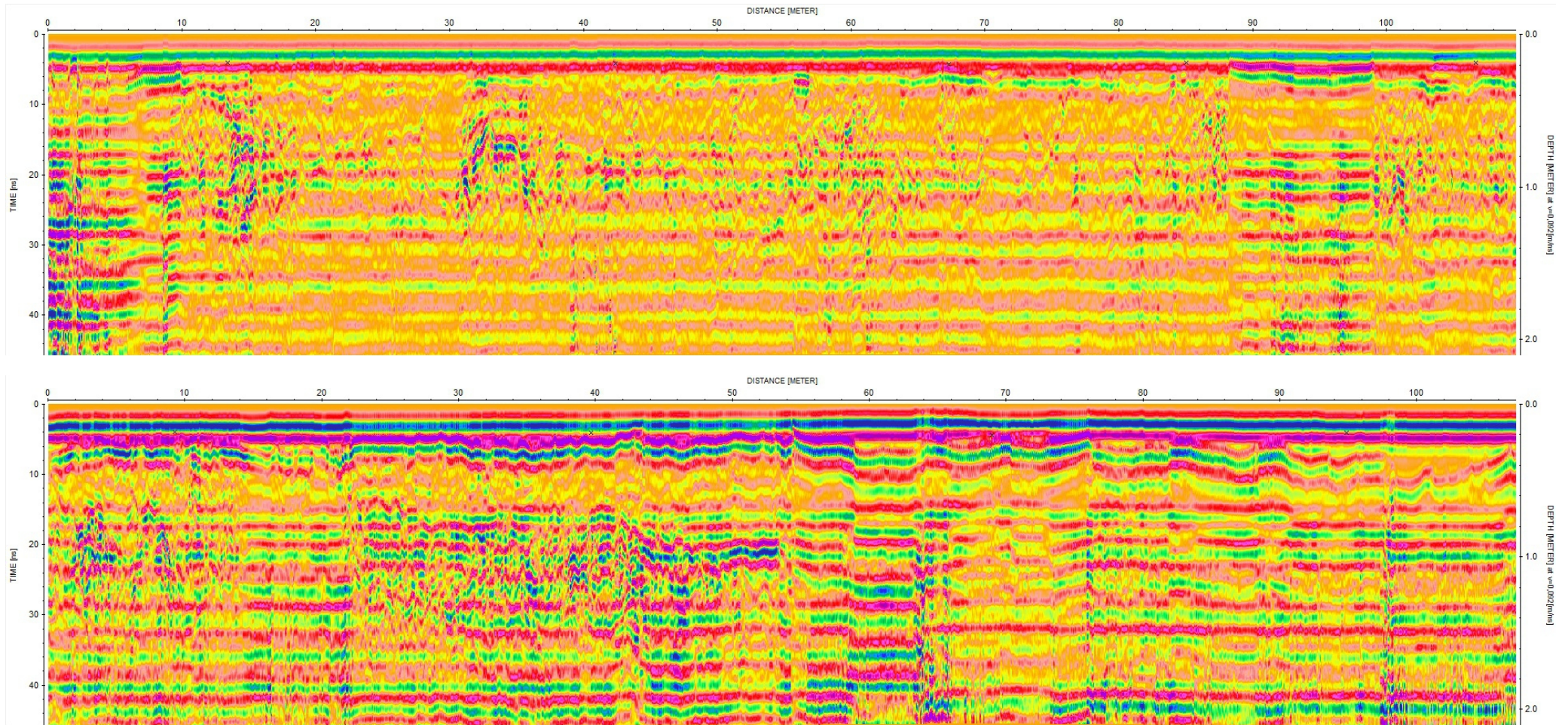
Perfils longitudinals 1 i 2 respectivament



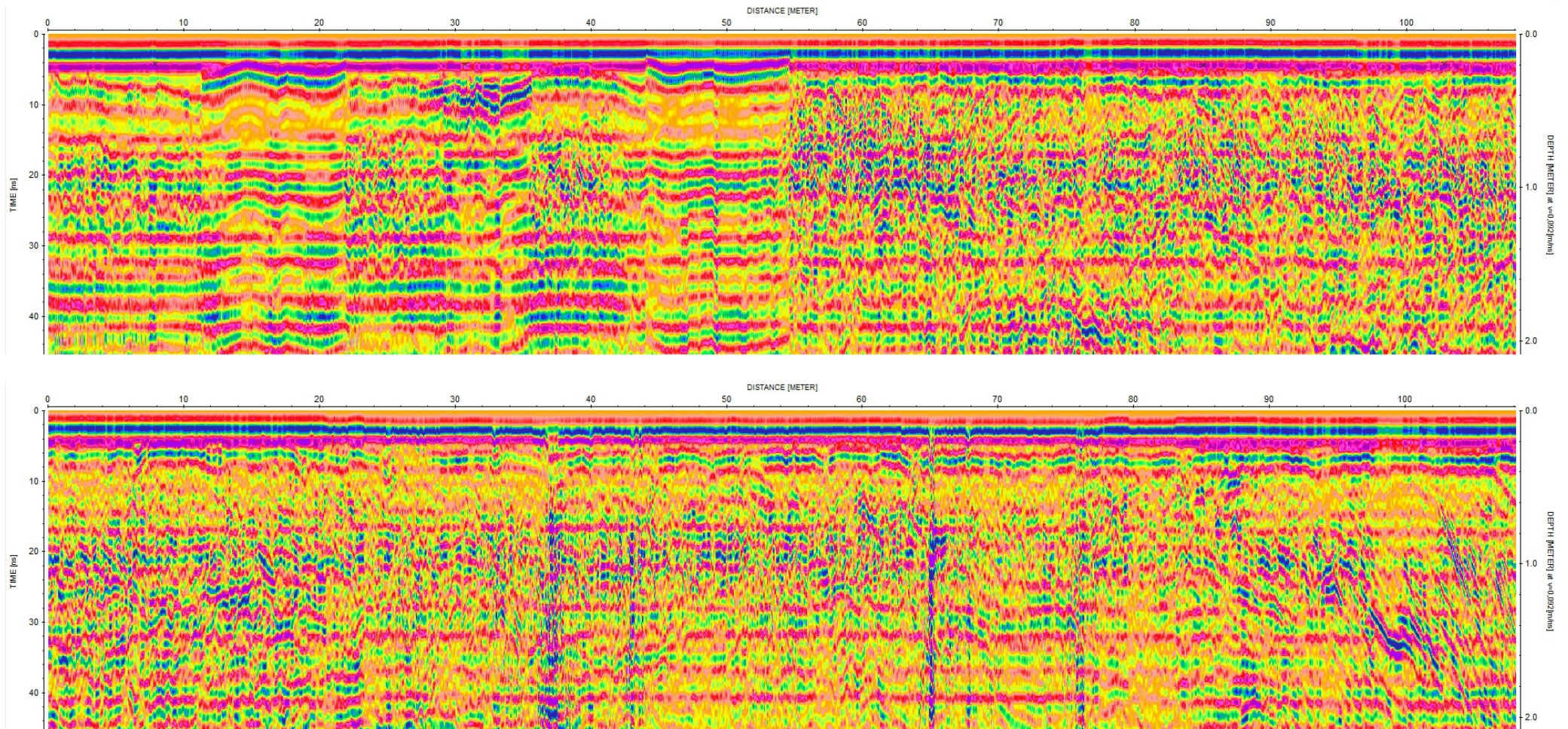
Perfils longitudinals 3 i 4 respectivament



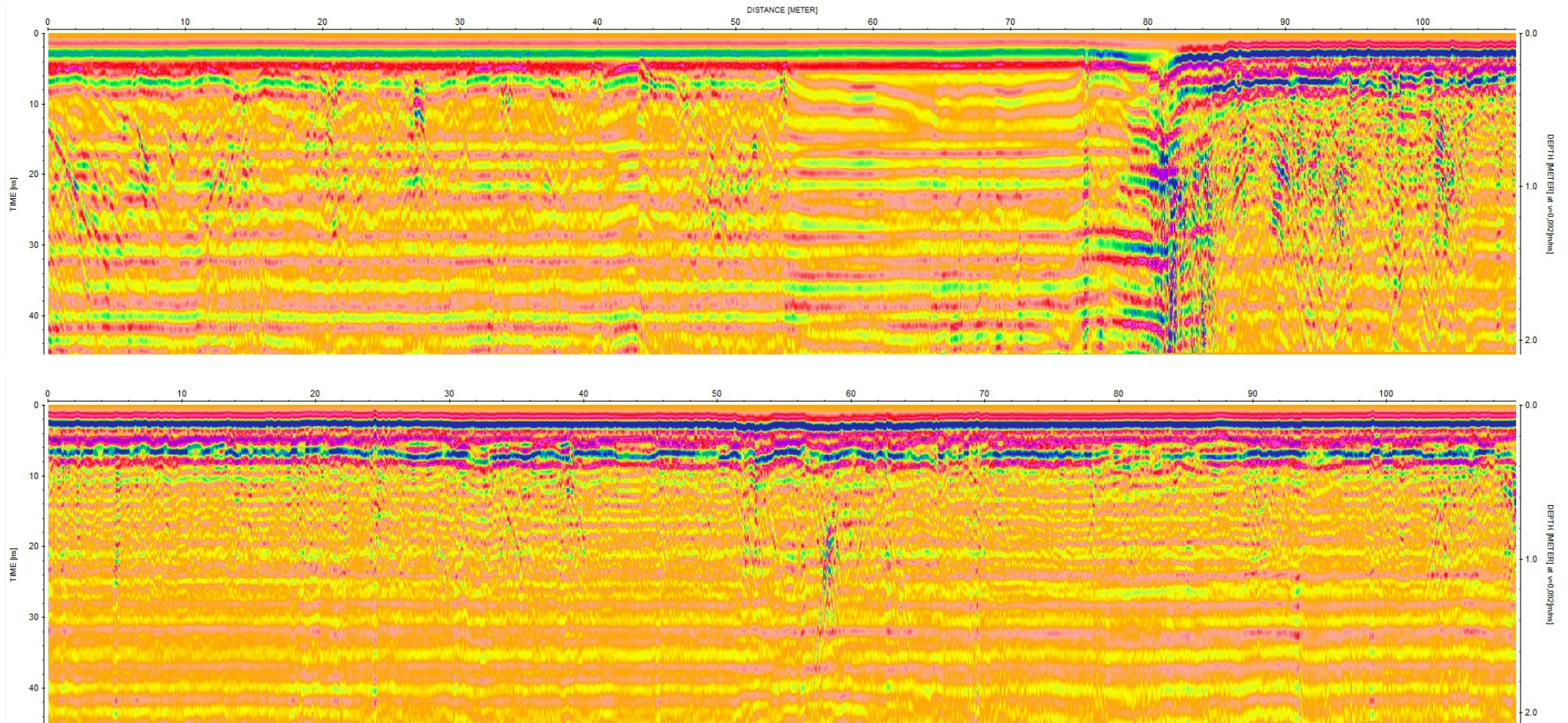
Perfils longitudinals 5 i 6 respectivament



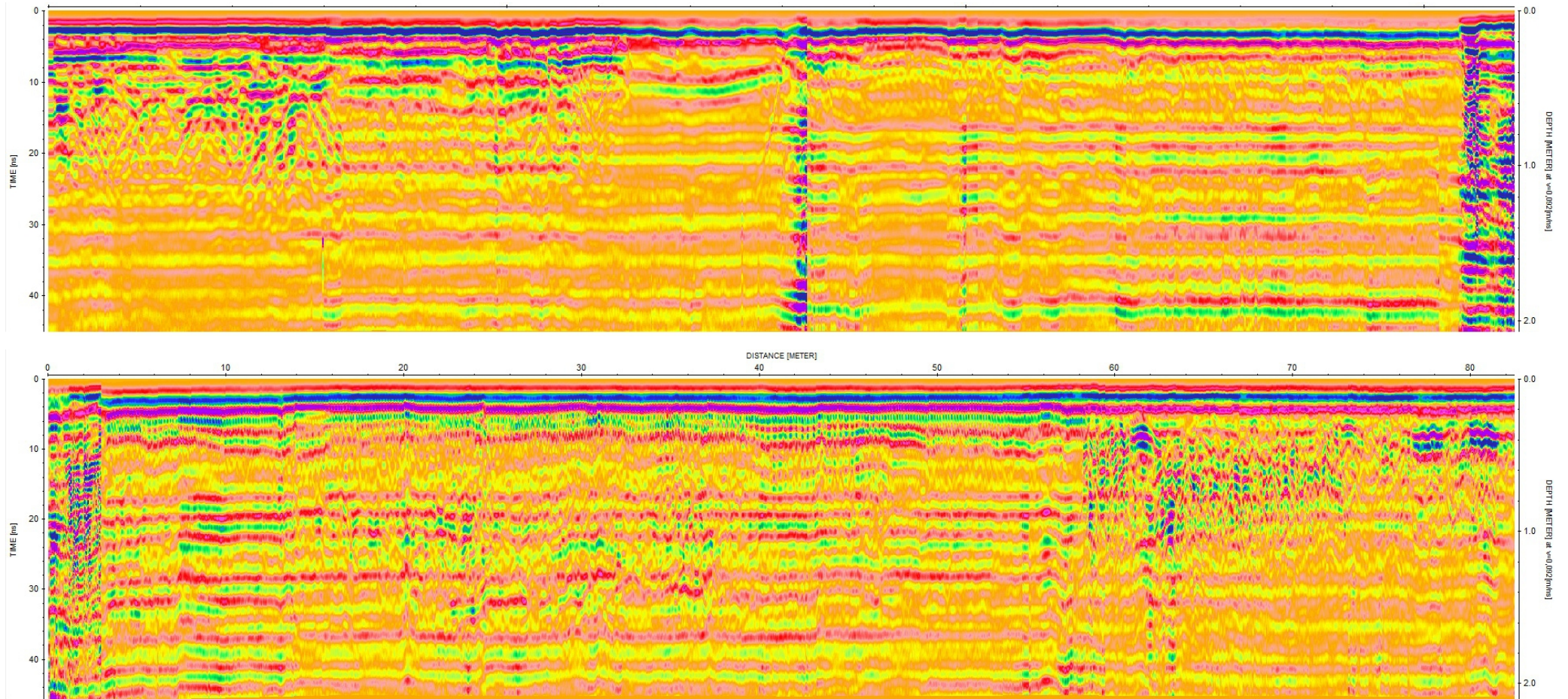
Perfils longitudinals 7 i 8 respectivament



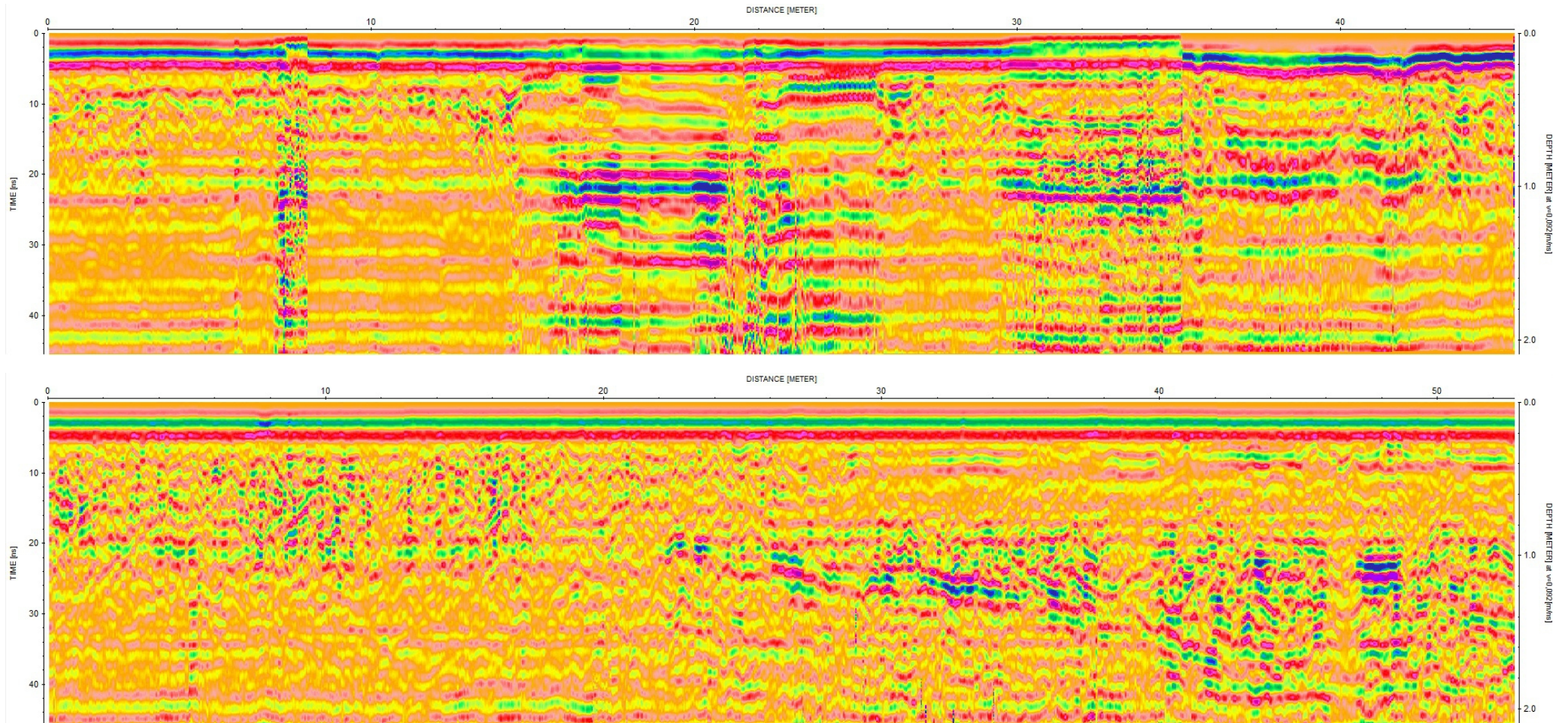
Perfils longitudinals 9 i 10 respectivament



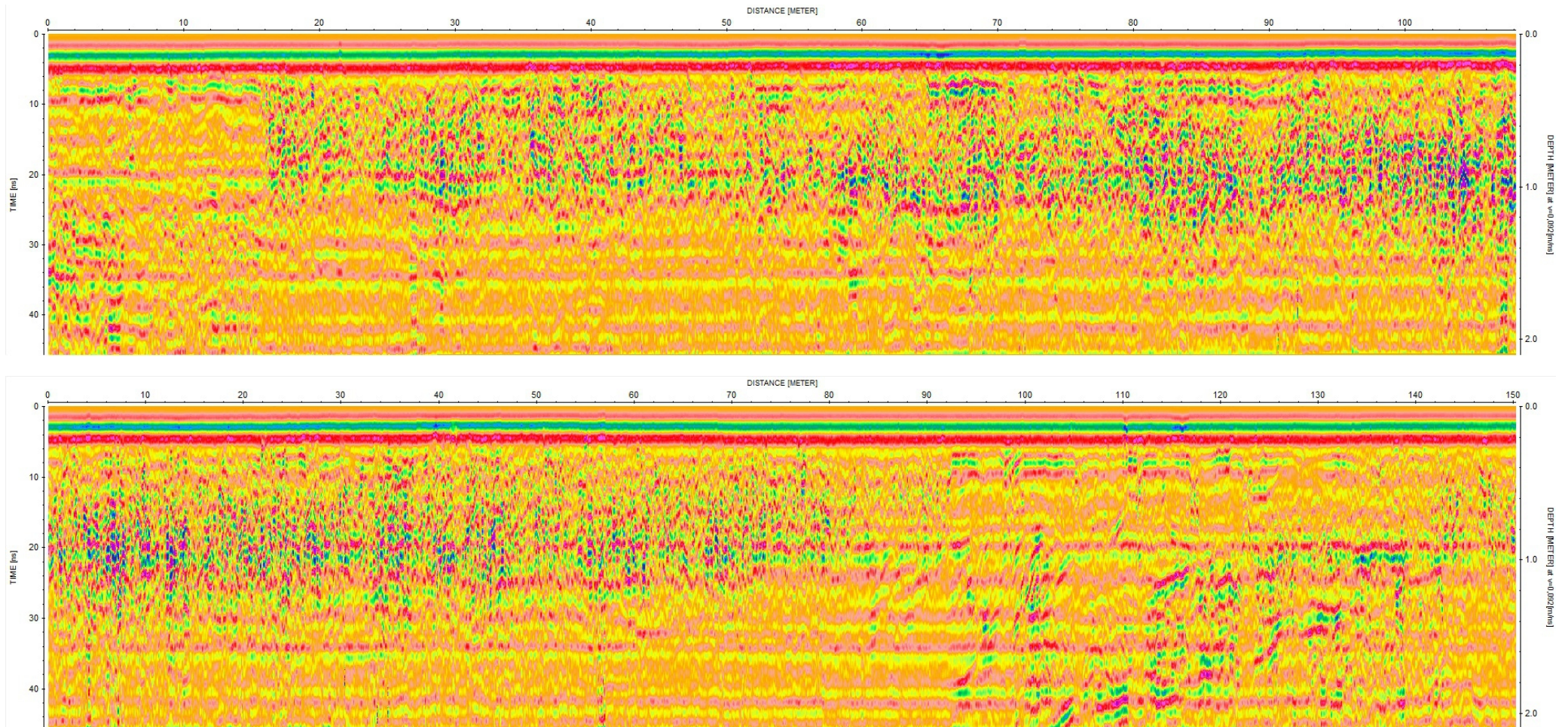
Perfils longitudinals 11 i 12 respectivament



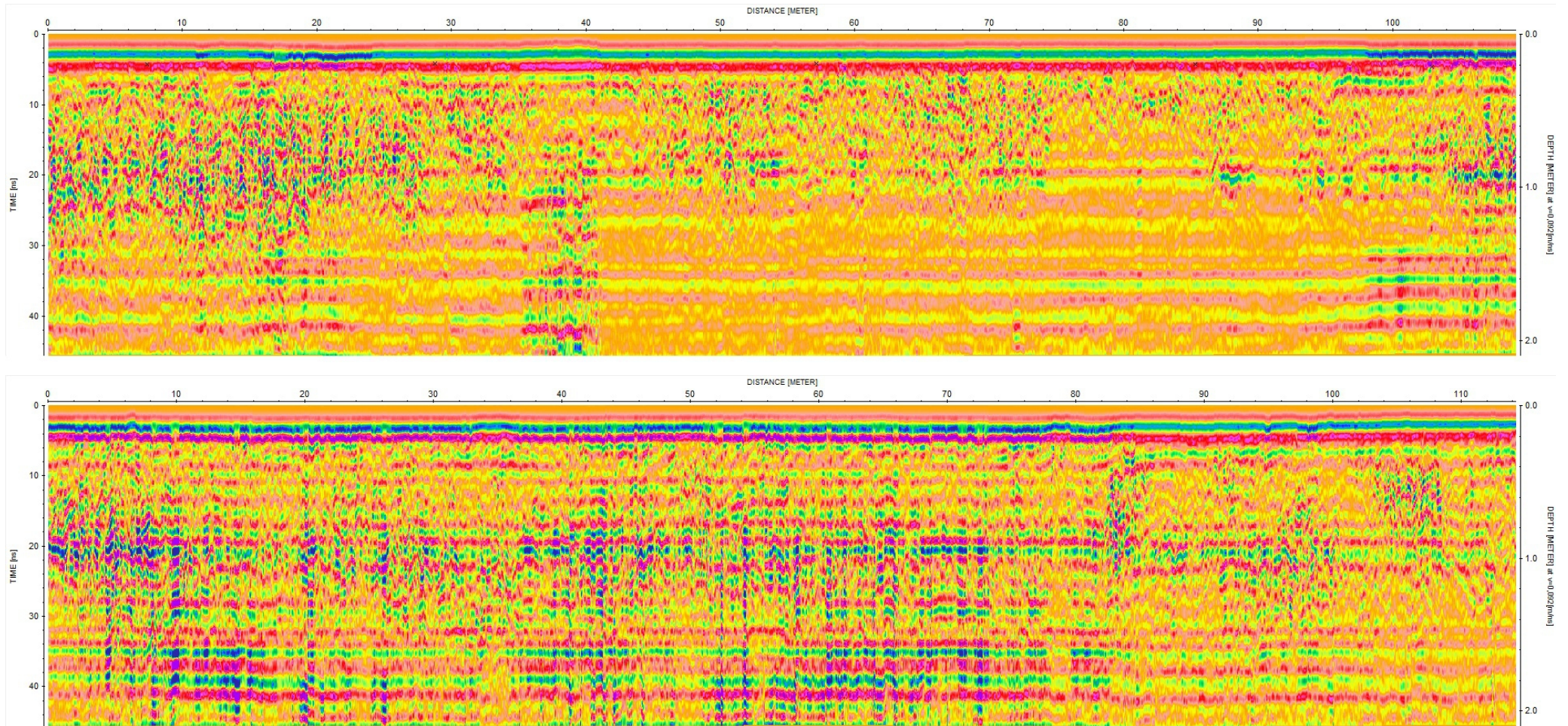
Perfils longitudinals 13 i 14 respectivament



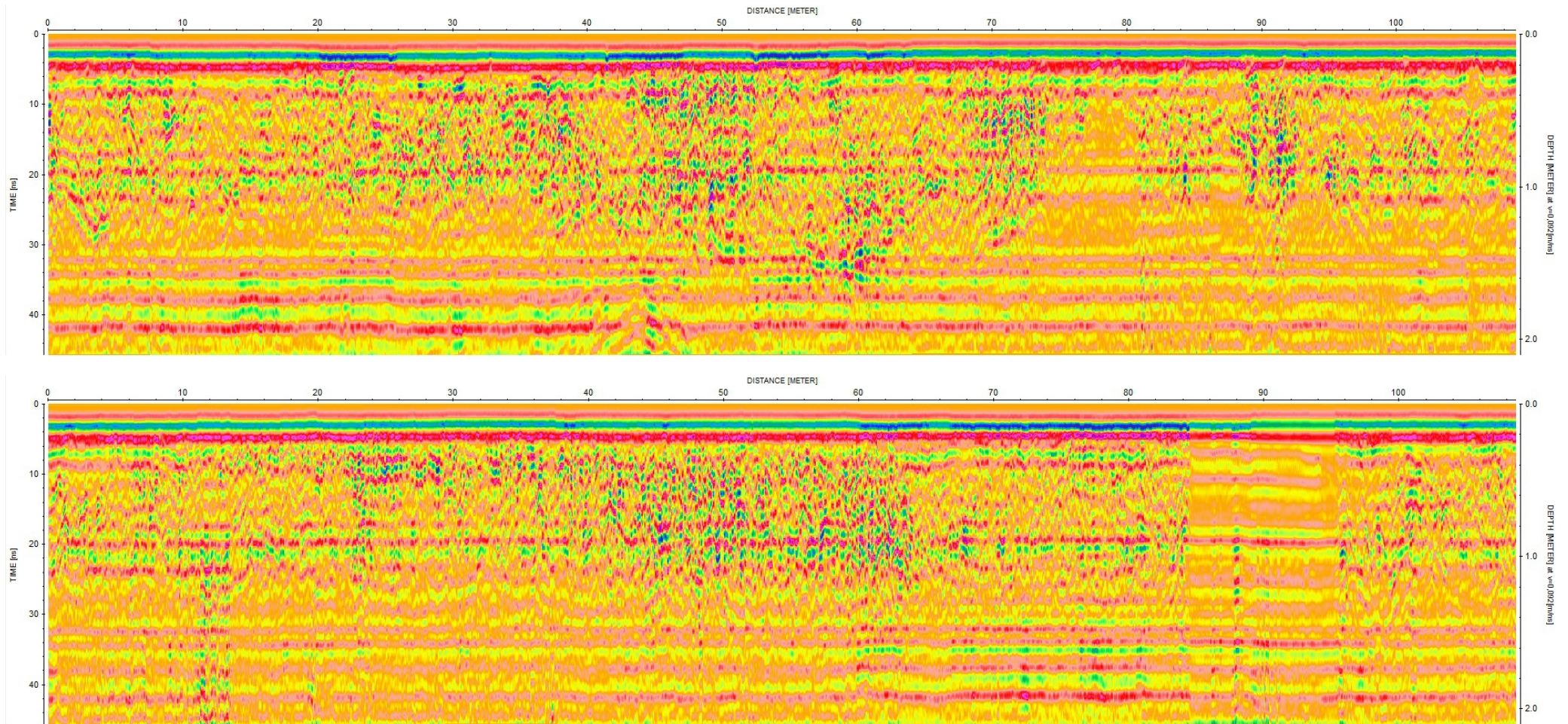
Perfils longitudinals 15 i 16 respectivament



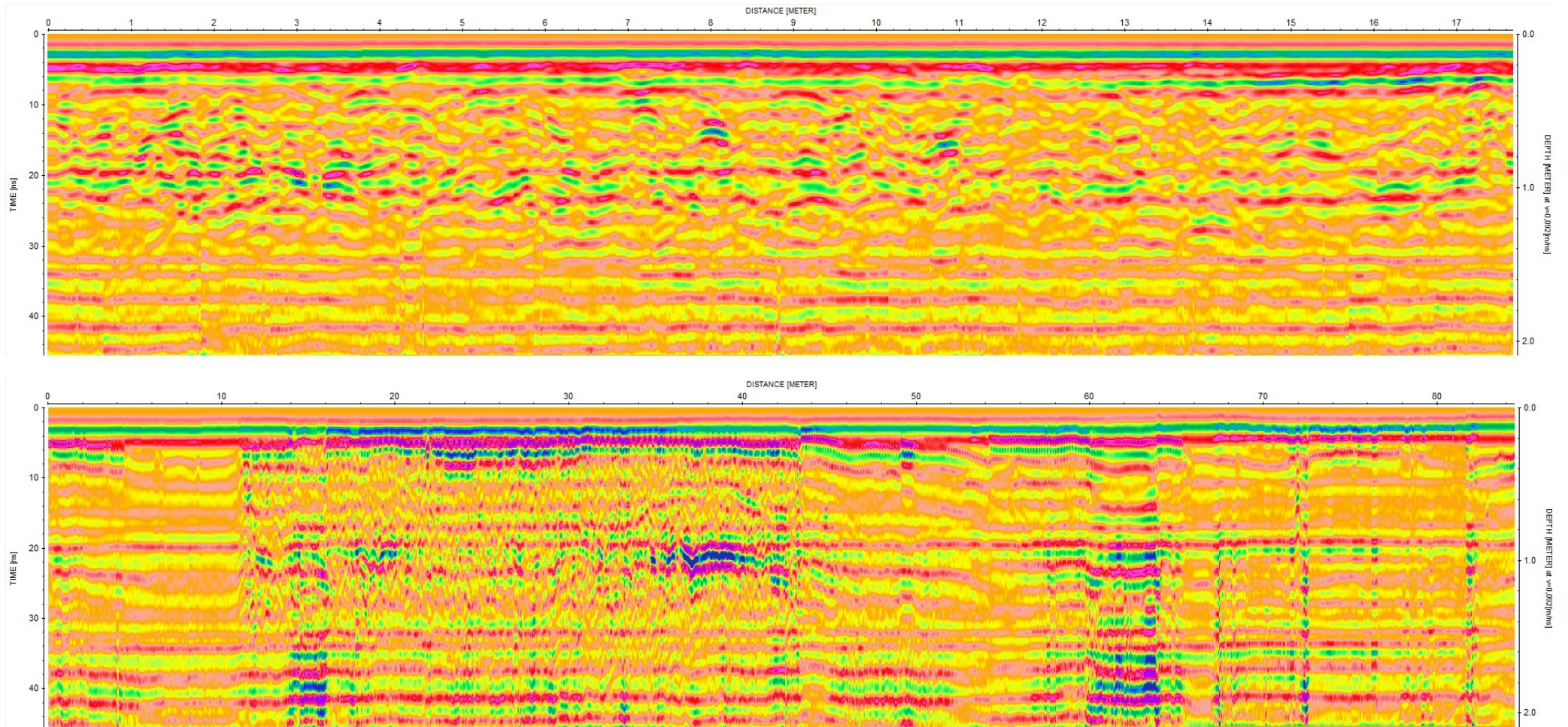
Perfils longitudinals17 i 18 respectivament



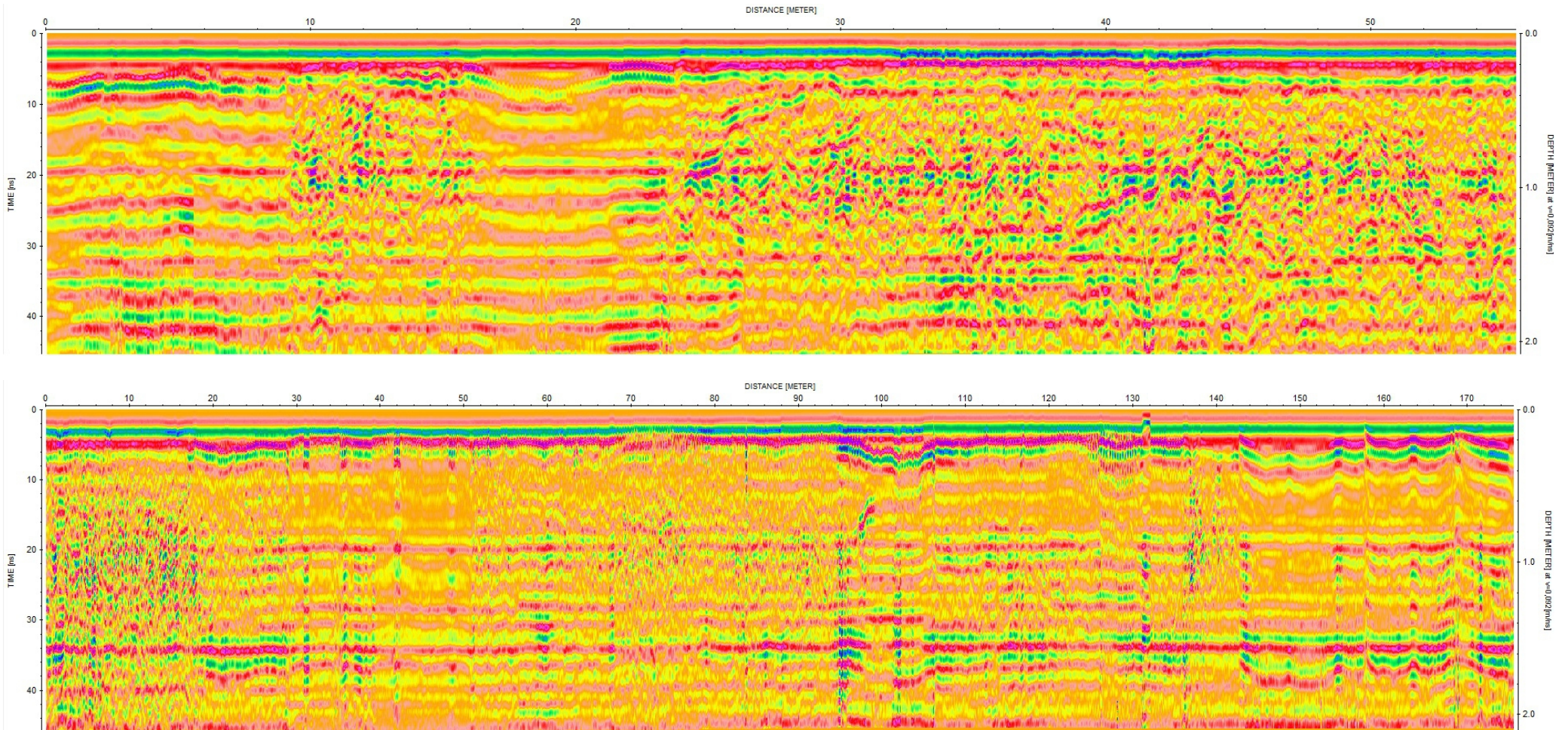
Perfils longitudinals 19 i 20 respectivament



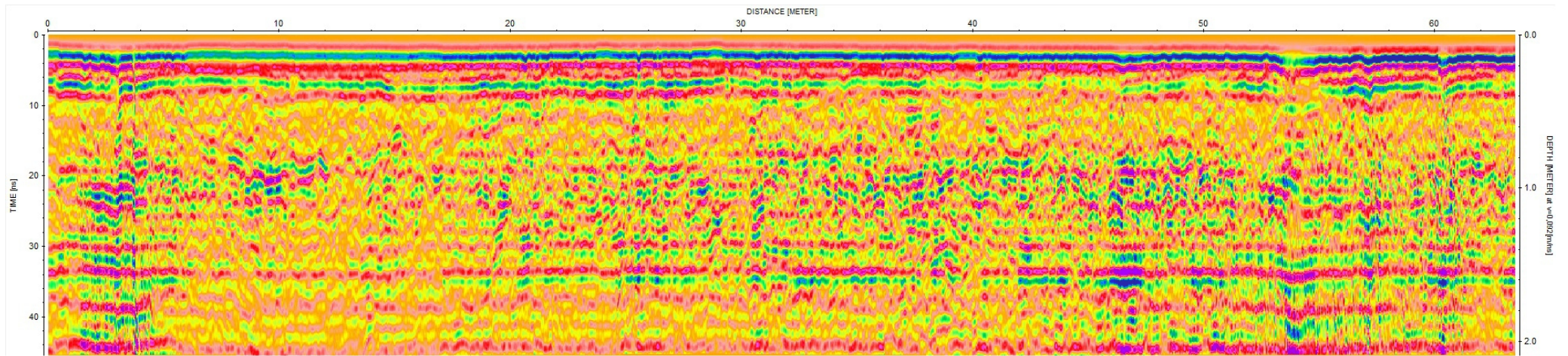
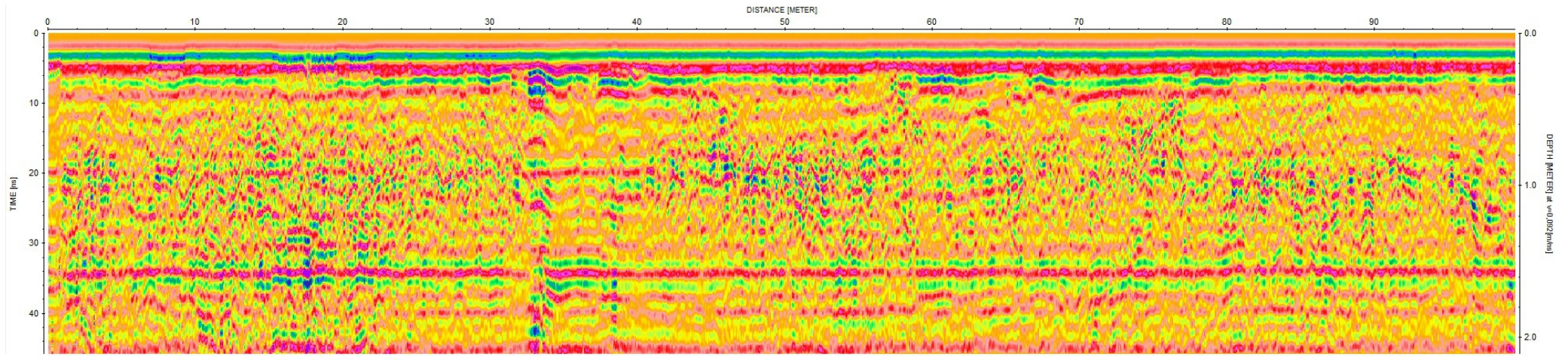
Perfils longitudinals 21 i 22 respectivament



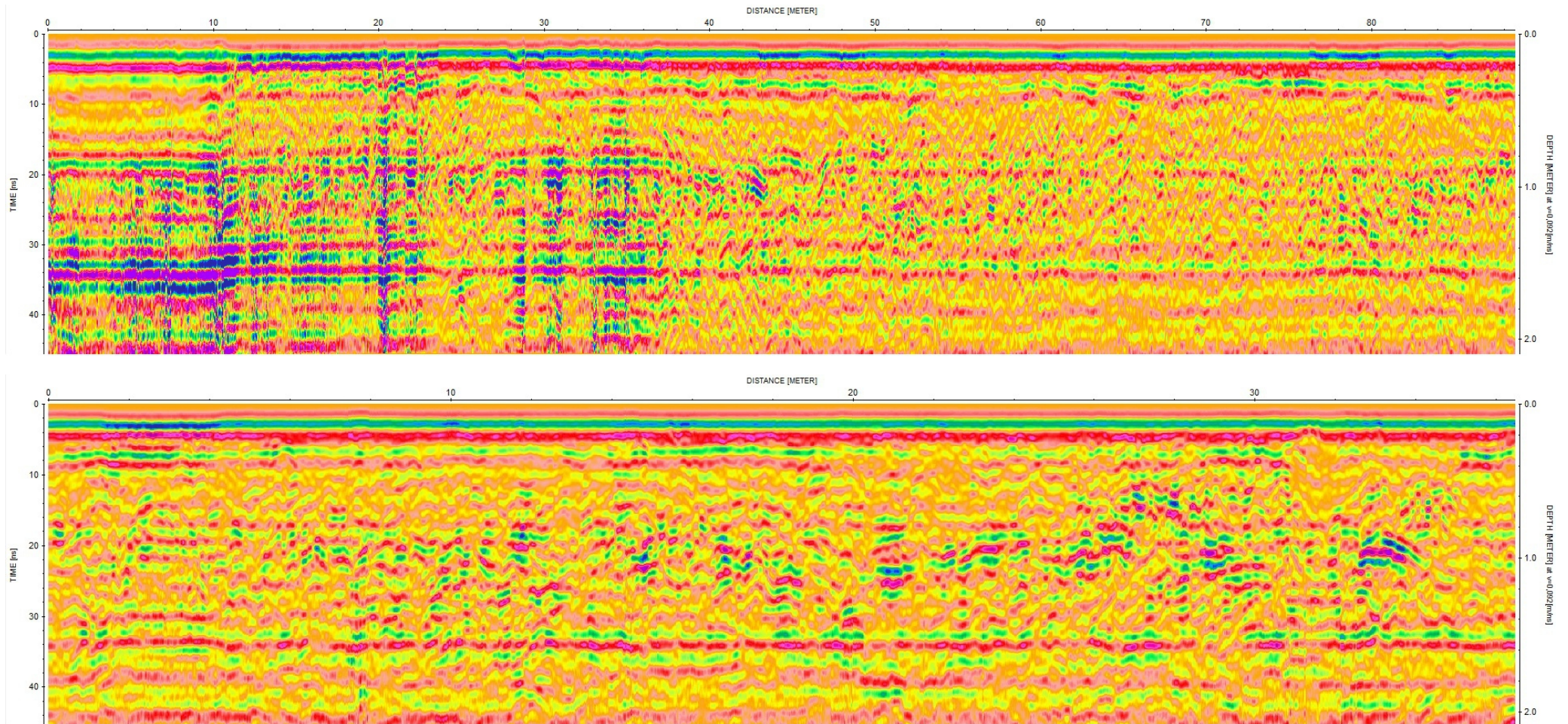
Perfils longitudinals 23 i 24 respectivament



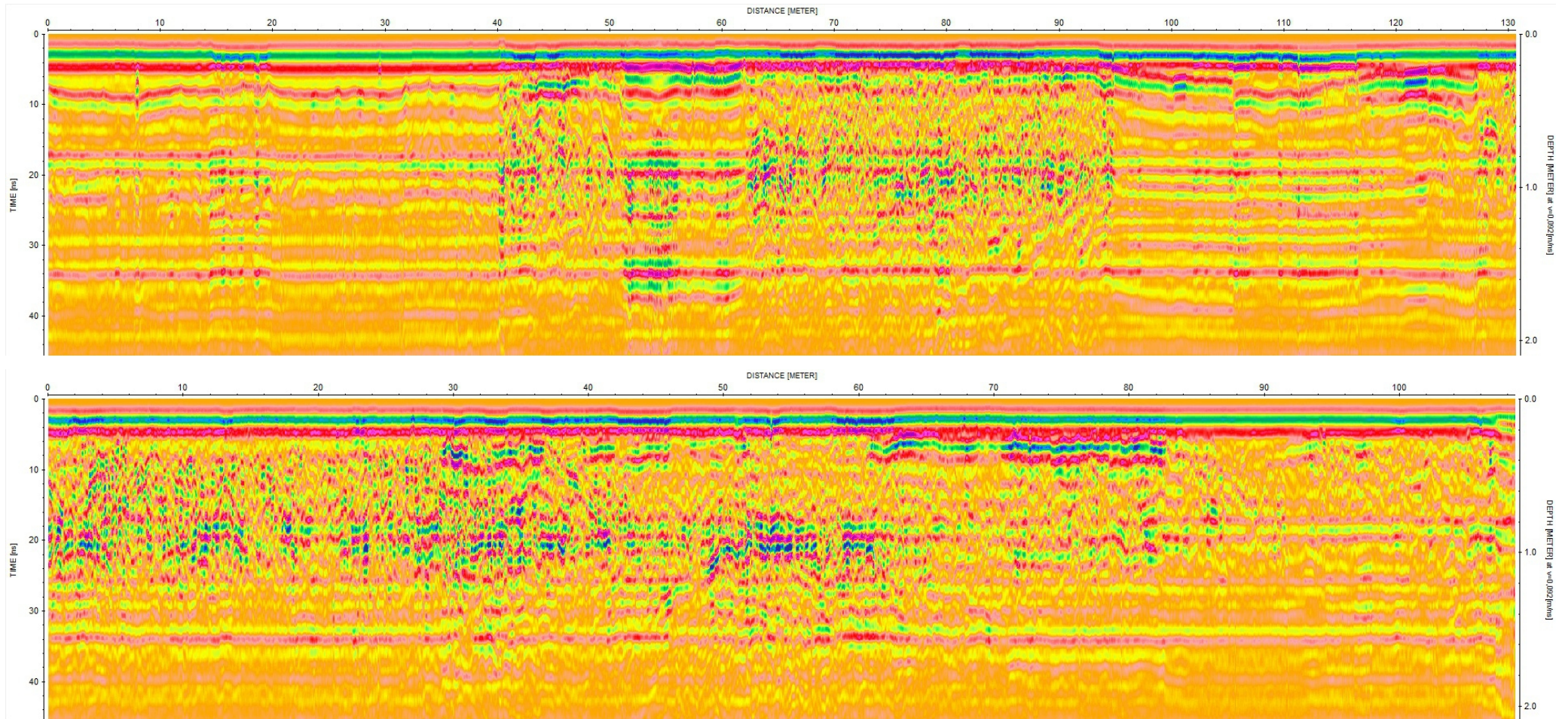
Perfils longitudinals 25 i 26 respectivament



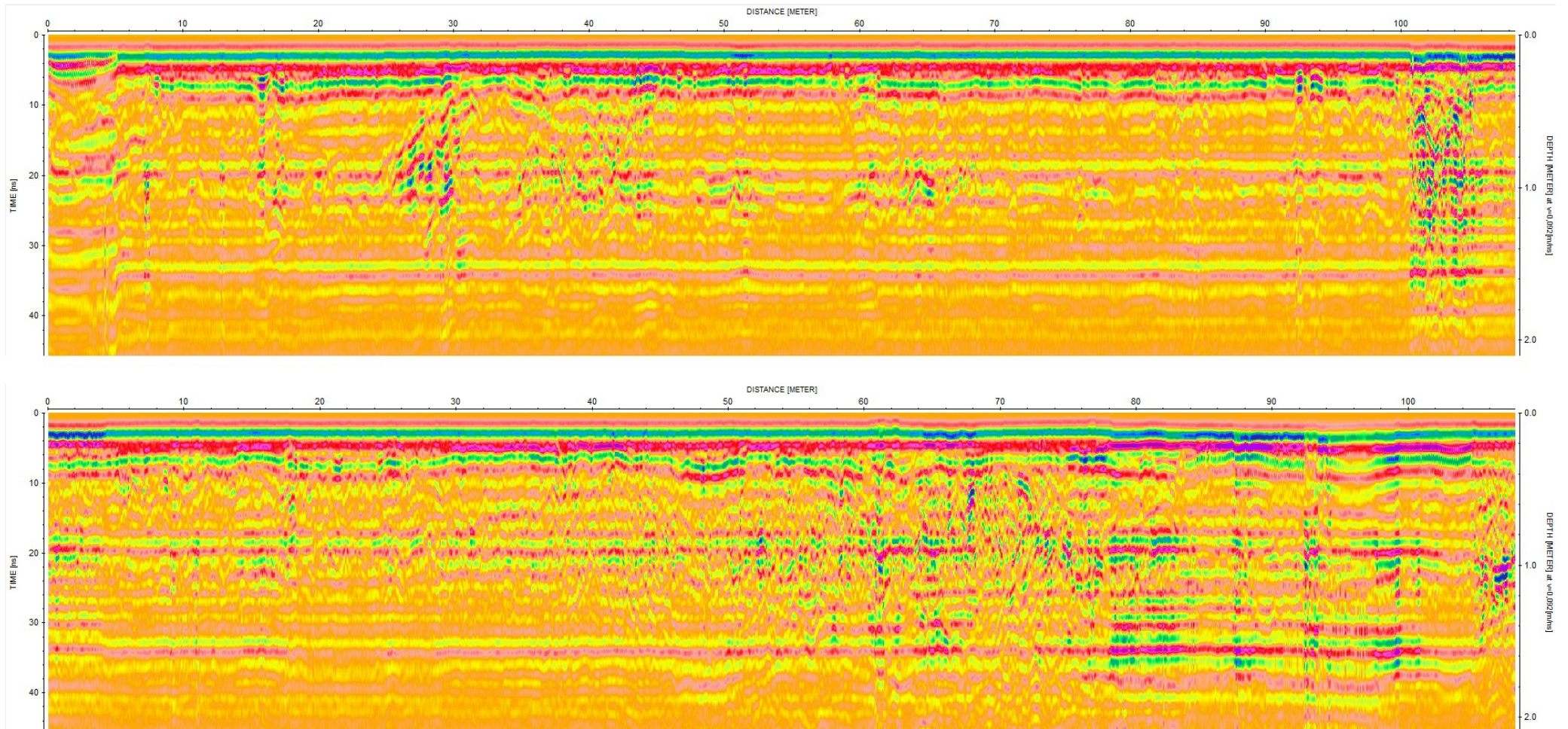
Perfils longitudinals 27 i 28 respectivament



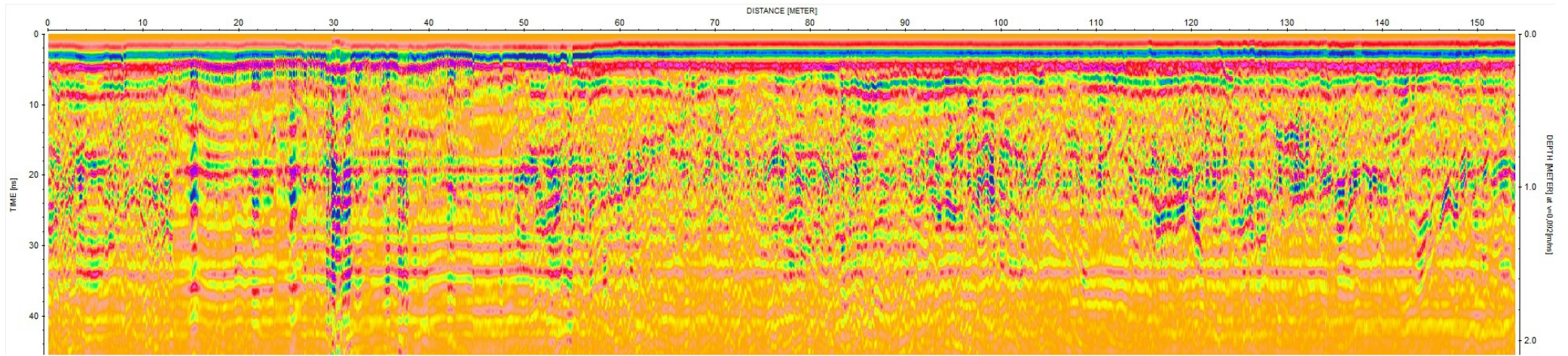
Perfils longitudinals 29 i 30 respectivament



Perfils longitudinals 31 i 32 respectivament

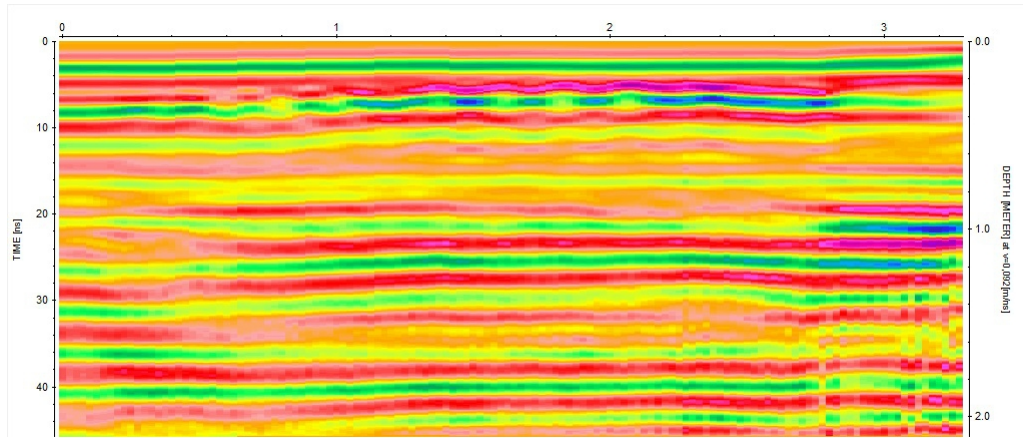


Perfils longitudinals 33 i 34 respectivament

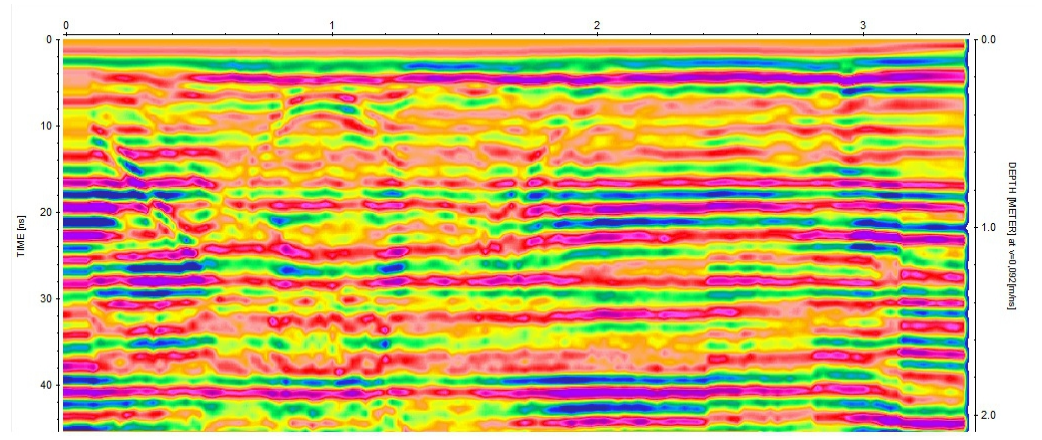


Perfil longitudinal 35

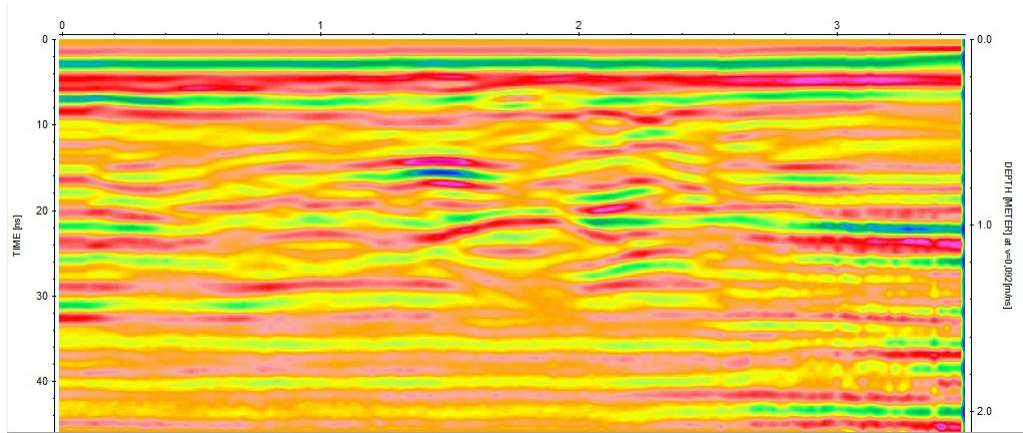
PERFILS TRANSVERSALS



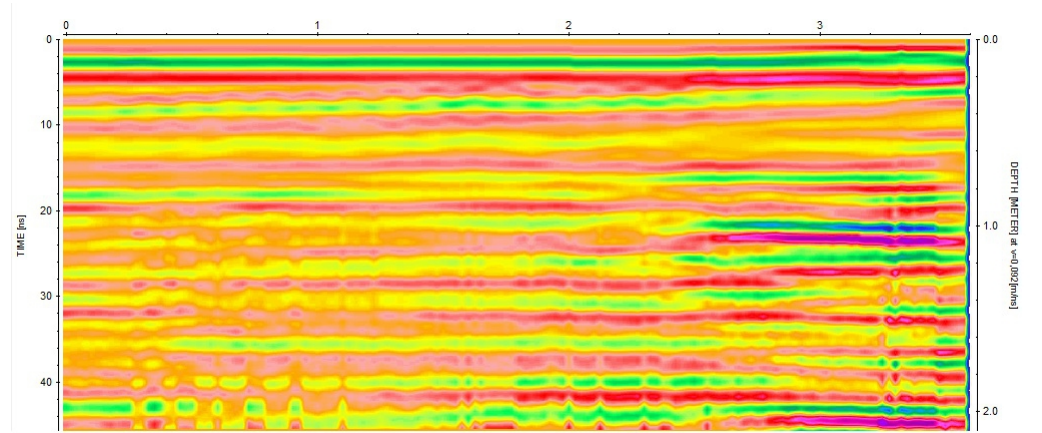
Perfil transversal 1



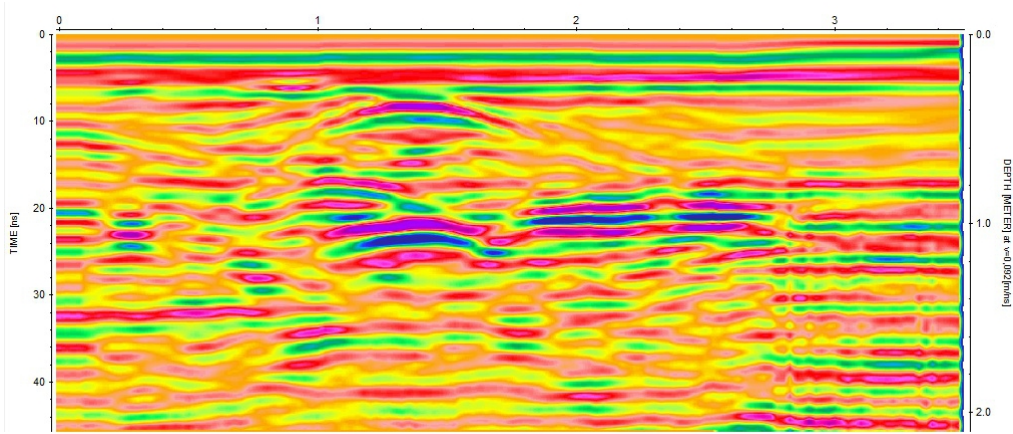
Perfil transversal 2



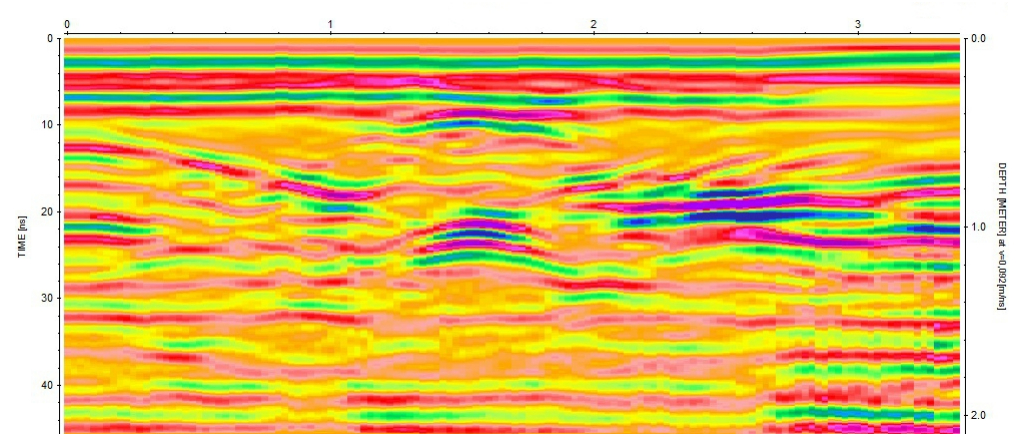
Perfil transversal 3



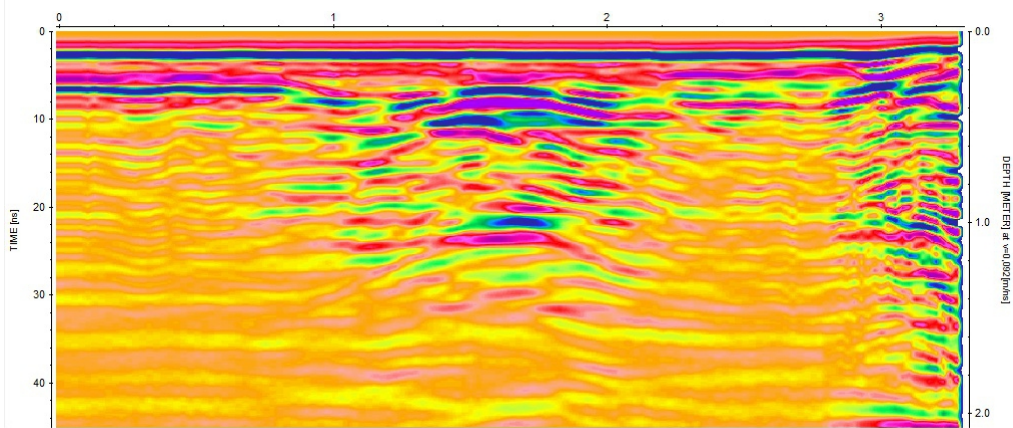
Perfil transversal 4



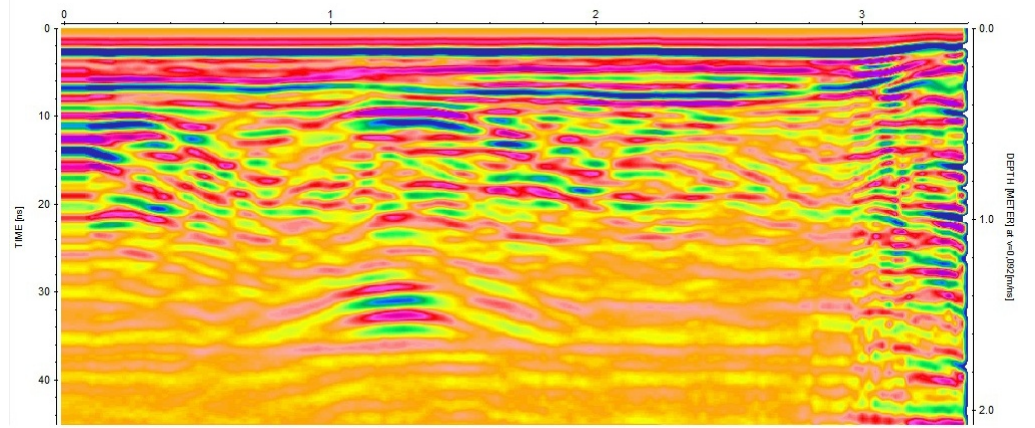
Perfil transversal 5



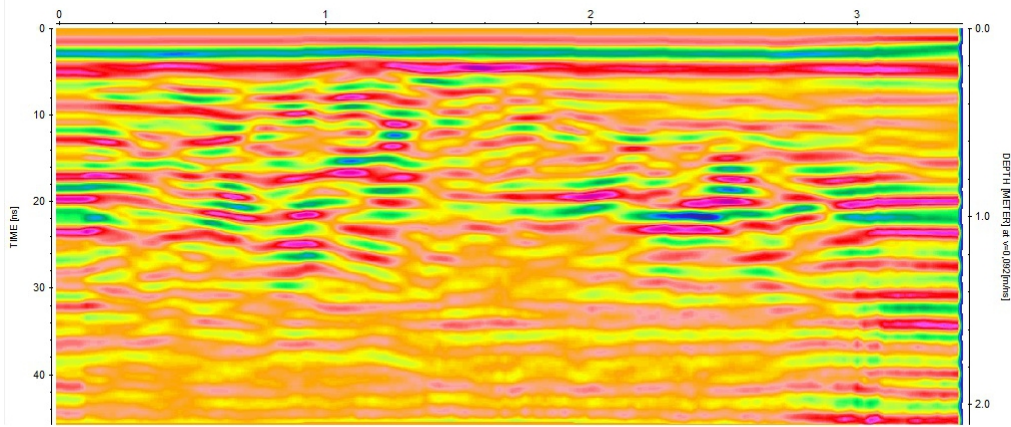
Perfil transversal 6



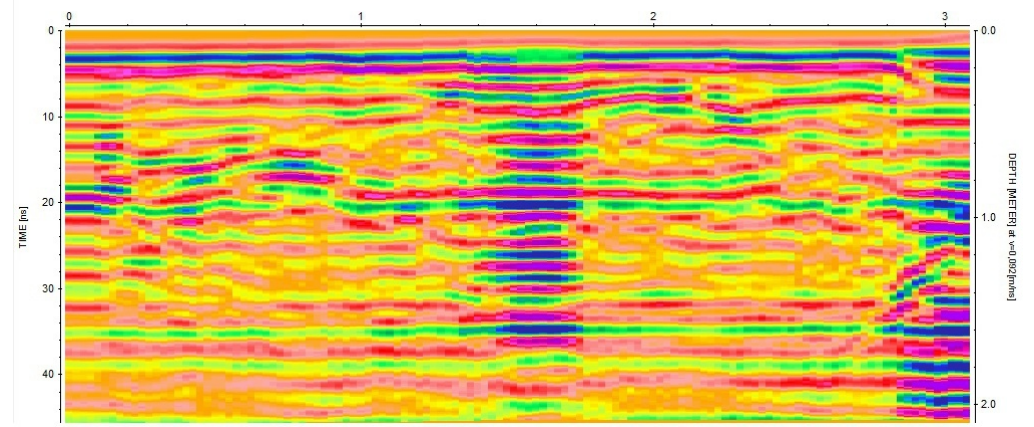
Perfil transversal 7



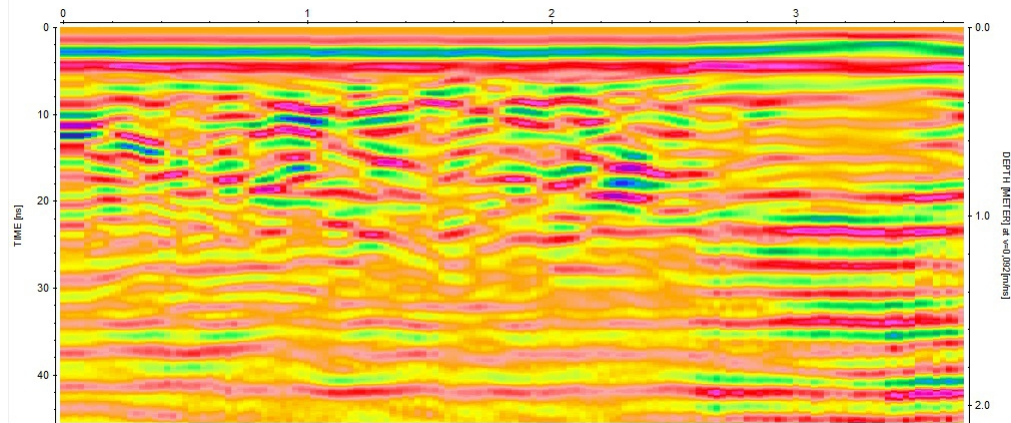
Perfil transversal 8



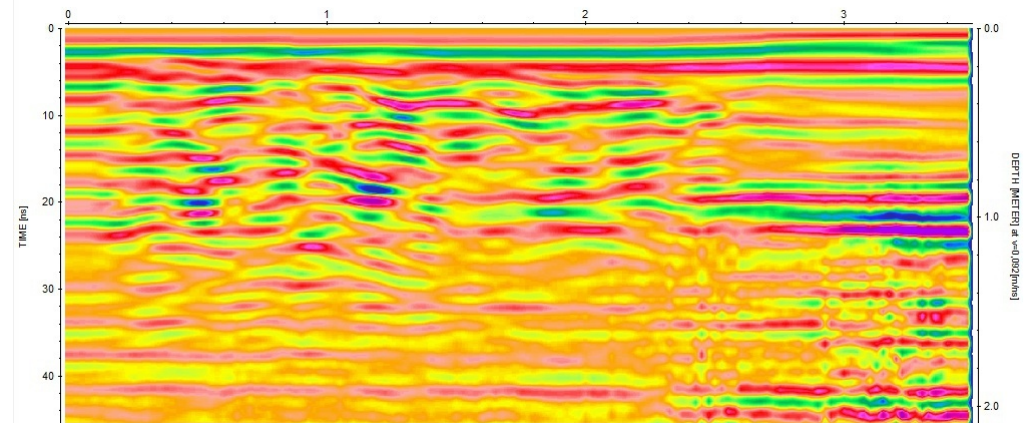
Perfil transversal 9



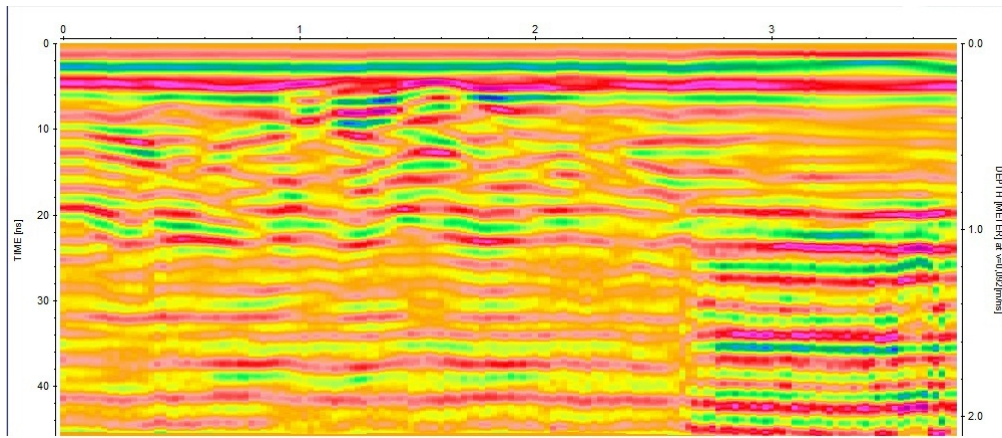
Perfil transversal 10



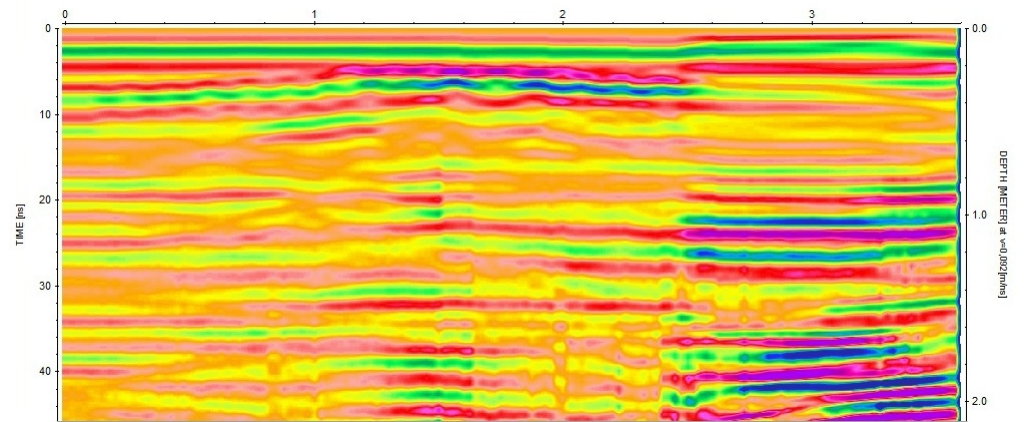
Perfil transversal 11



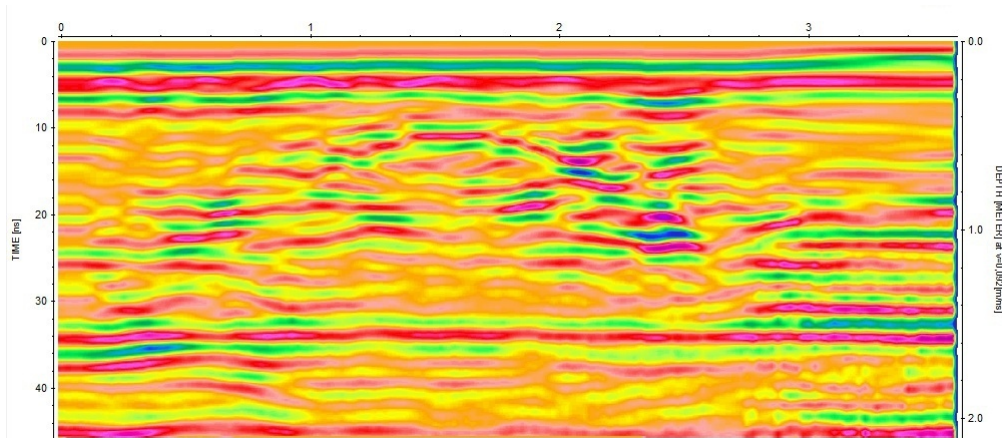
Perfil transversal 12



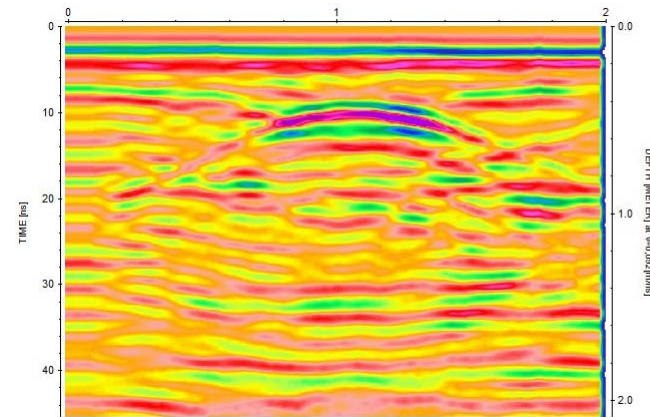
Perfil transversal 13



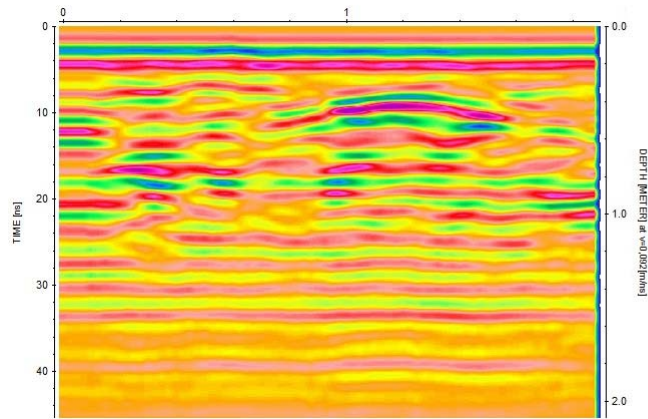
Perfil transversal 14



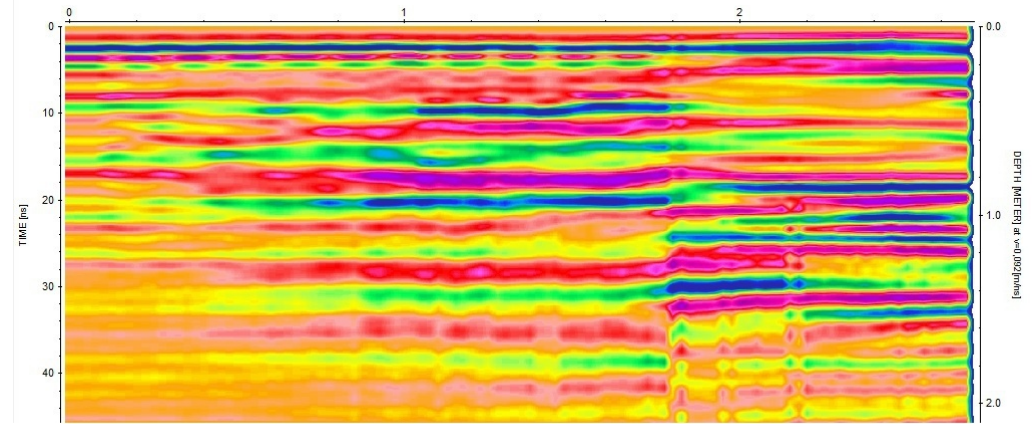
Perfil transversal 15



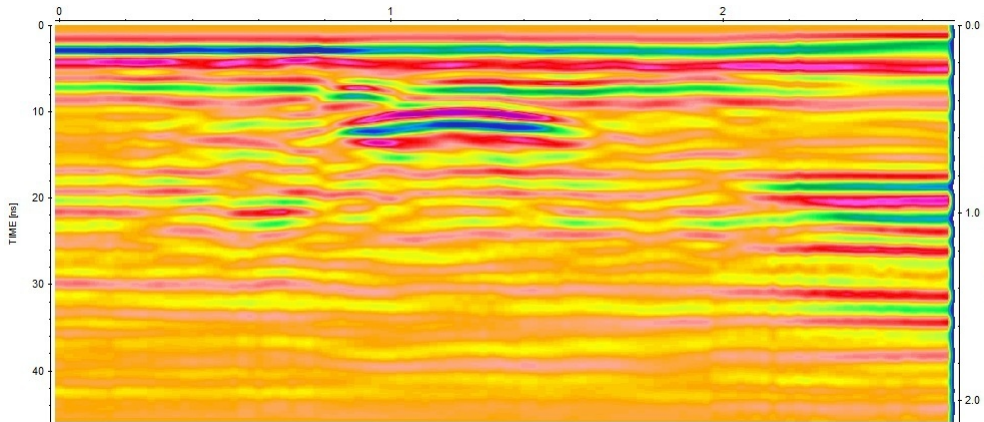
Perfil transversal 16



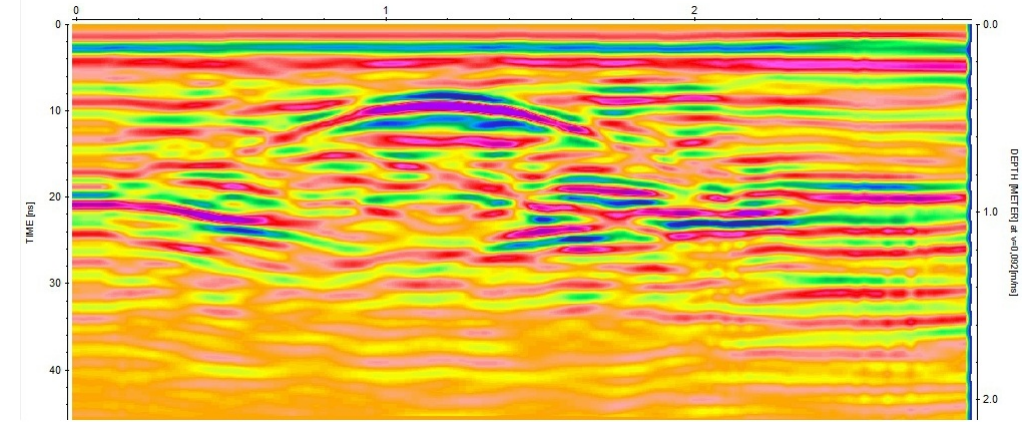
Perfil transversal 17



Perfil transversal 18



Perfil transversal 19



Perfil transversal 20

ANNEX IV: LLIBRETA DE CAMP

- PERFIL LONGITUDINAL 1: Arxiu FILE____072.DZT. Inici a PK 0+600. Costat de les marques
- PERFIL LONGITUDINAL 2: Arxiu FILE____073.DZT . Inici a PK 0+500. Costat de les marques
- PERFIL LONGITUDINAL 3: Arxiu FILE____074.DZT . Inici a PK 0+400. Costat de les marques
- PERFIL LONGITUDINAL 4: Arxiu FILE____075.DZT . Inici a PK 0+300. Costat de les marques. Aquest perfil acaba en un basal d'aigua
- PERFIL LONGITUDINAL 5: Arxiu FILE____076.DZT . Inici a PK 0+200. Costat de les marques . Aquest perfil inicia en un basal d'aigua. Acaba en la franja de l'aigua. La xarxa de cable.
- PERFIL TRANSVERSAL 1: Arxiu FILE____077.DZT. Situat just a la franja
- PERFIL LONGITUDINAL 6: Arxiu FILE____078.DZT . Perfil de tornada. Inici a la franja i acaba PK 0+200. Acaba amb en una zona d'aigua. Perfil Equivalent a FILE____076.DZT (Perfil Longitudinal 5).
- PERFIL TRANSVERSAL 2: Arxiu FILE____079.DZT. Situat al PK 0+200.
- PERFIL LONGITUDINAL 7: Arxiu FILE____080.DZT . Inici a PK 0+200 acaba PK 0+300. Perfil Equivalent a FILE____075.DZT (Perfil Longitudinal 4)
- PERFIL TRANSVERSAL 3: Arxiu FILE____081.DZT. Situat al PK 0+300.
- PERFIL LONGITUDINAL8: Arxiu FILE____082.DZT . Inici a PK 0+300 acaba PK 0+400. Perfil Equivalent a FILE____074.DZT (Perfil Longitudinal 3)
- PERFIL TRANSVERSAL 4: Arxiu FILE____083.DZT. Situat al PK 0+400.
- PERFIL LONGITUDINAL 9: Arxiu FILE____084.DZT . Inici a PK 0+400 acaba PK 0+500. Perfil Equivalent a FILE____073.DZT (Perfil Longitudinal 2)
- PERFIL TRANSVERSAL 5: Arxiu FILE____085.DZT. Situat al PK 0+500.
- PERFIL LONGITUDINAL 10: Arxiu FILE____086.DZT . Inici a PK 0+500 acaba PK 0+600. Perfil Equivalent a FILE____072.DZT (Perfil Longitudinal 1). A 20m comença aigua i acaba a 23m. A 30m hi ha un rebot d'una canonada d'acer. A 65.5m hi ha una junta amb asfalt, possible barra de ferro. A 76.05m el mateix que a 65.5m.
- PERFIL TRANSVERSAL 6: Arxiu FILE____087.DZT. Situat al PK 0+600.

PERFIL LONGITUDINAL 11: Arxiu FILE____088.DZT . Inici a PK 0+600 acaba PK 0+700. Aigua des de 75m a 85.8m.

PERFIL TRANSVERSAL 7: Arxiu FILE____089.DZT. Situat al PK 0+700.

PERFIL LONGITUDINAL 12: Arxiu FILE____090.DZT . Inici a PK 0+700 acaba PK 0+800.

PERFIL TRANSVERSAL 8: Arxiu FILE____091.DZT. Situat al PK 0+800.

PERFIL LONGITUDINAL 13: Arxiu FILE____092.DZT . Inici a PK 0+800. Aigua des de 13m fins final perfil. El perfil no té 100m perquè hi havia ferralla.

PERFIL LONGITUDINAL 14: Arxiu FILE____093.DZT. Continuació del perfil anterior. Acaba on hi ha obres.

PERFIL LONGITUDINAL 15: Arxiu FILE____094.DZT. Continuació del perfil anterior.

PERFIL LONGITUDINAL 16: Arxiu FILE____095.DZT. Inici a 16m del pont i acaba al PK 1+100.

PERFIL LONGITUDINAL 17: Arxiu FILE____096.DZT. Inici a PK 1+100 i acaba al PK 1+200

PERFIL TRANSVERSAL 9: Arxiu FILE____097.DZT. Situat al PK 1+200.

PERFIL LONGITUDINAL 18: Arxiu FILE____098.DZT. Inici al PK 1+200 i acaba 2m més enllà del pont. Costat de les marques.

PERFIL LONGITUDINAL 19: Arxiu FILE____099.DZT. Perfil Equivalent a FILE____098.DZT (Perfil Longitudinal 18). Inici a al PK 1+200 i acaba al PK 1+300. Hi ha aigua des de 16m fins 24m. A 96 torna a haver-hi aigua.

PERFIL TRANSVERSAL 10: Arxiu FILE____100.DZT. Situat al PK 1+300.

PERFIL LONGITUDINAL 20: Arxiu FILE____101.DZT. Inici al PK 1+300 i acaba al PK 1+400. Tallar a 108.47 perquè no he vist el PK i el perfil s'ha fet més llarg.

PERFIL TRANSVERSAL 11: Arxiu FILE____102.DZT. Situat al PK 1+400.

PERFIL LONGITUDINAL 21: Arxiu FILE____103.DZT. Inici al PK 1+400 i acaba al PK 1+500. A 18.70m comença aigua i s'acaba a 25.80m. Existència d'un pont a 43.10m del inici del perfil.

PERFIL TRANSVERSAL 12: Arxiu FILE____104.DZT. Situat al PK 1+500.

PERFIL LONGITUDINAL 22: Arxiu FILE____105.DZT. Inici al PK 1+500 i acaba al PK 1+600. A 59.70m comença aigua i s'acaba a 79m.

PERFIL TRANSVERSAL 13: Arxiu FILE____106.DZT. Situat al PK 1+600.

PERFIL LONGITUDINAL 23: Arxiu FILE____107.DZT. Inici a PK 1+600. Longitud de 17.4m degut a l'existència de molta aigua en superfície.

PERFIL LONGITUDINAL 24: Arxiu FILE____108.DZT. Inici on acaba l'aigua i acaba al pont situat abans del PK 1+800. A 11.1m, llosa armada.

PERFIL TRANSVERSAL 14: Arxiu FILE____109.DZT. Situat a sota del pont.

PERFIL LONGITUDINAL 25: Arxiu FILE____110.DZT. Inici a sota del pont i acaba al PK 1+800. A 30.6 hi ha aigua.

PERFIL LONGITUDINAL 26: Arxiu FILE____111.DZT. Inici al PK 1+800 i acaba a 174m. Hi ha molta aigua.

PERFIL LONGITUDINAL 27: Arxiu FILE____112.DZT. Inici a 6m del PK 2+000 i acaba al PK 2+100.

PERFIL TRANSVERSAL 15: Arxiu FILE____113.DZT. Situat al PK 2+100.

PERFIL LONGITUDINAL 28: Arxiu FILE____114.DZT. Inici al PK 2+100 i acaba uns 50m abans del PK 2+200.

PERFIL LONGITUDINAL 29: Arxiu FILE____115.DZT. Inici quan acaba l'aigua i acaba al PK 2+300.

PERFIL TRANSVERSAL 16: Arxiu FILE____116.DZT. Situat al PK 2+300.

PERFIL LONGITUDINAL 30: Arxiu FILE____117.DZT. Inici al PK 2+300 i acaba quan hi ha aigua.

PERFIL LONGITUDINAL 31: Arxiu FILE____118.DZT. Inici quan ja no hi ha aigua i acaba al PK 2+500.

PERFIL TRANSVERSAL 17: Arxiu FILE____119.DZT. Situat al PK 2+500.

PERFIL LONGITUDINAL 32: Arxiu FILE____120.DZT. Inici al PK 2+500 i acaba al PK 2+600.

PERFIL TRANSVERSAL 18: Arxiu FILE____121.DZT. Situat al PK 2+600.

PERFIL LONGITUDINAL 33: Arxiu FILE____122.DZT. Inici al PK 2+600 i acaba al PK 2+700.

PERFIL TRANSVERSAL 19: Arxiu FILE____123.DZT. Situat al PK 2+700.

PERFIL LONGITUDINAL 34: Arxiu FILE____124.DZT. Inici al PK 2+700 i acaba al PK 2+800.

PERFIL TRANSVERSAL 20: Arxiu FILE____125.DZT. Situat al PK 2+800.

PERFIL LONGITUDINAL 35: Arxiu FILE____126.DZT. Inici al PK 2+800 i acaba al PK 2+948.