

HIDROGEOLOGÍA APLICADA A LA EXCAVACIÓN DE OBRAS SUBTERRÁNEAS, EL CASO DE ESTUDIO DEL TÚNEL SANTA ELENA, CORREDOR VIAL ABURRA ORIENTE, MEDELLÍN, COLOMBIA.

Por: Juan Antonio Silva¹

¹ GEODATA Engineering
S.p.A.



Portal Oriental Túnel 1 Santa Elena

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

- ✓ Localización del túnel Santa Elena
- ✓ Características principales del Túnel Santa Elena
- ✓ Pre-inyecciones como medida de mitigación

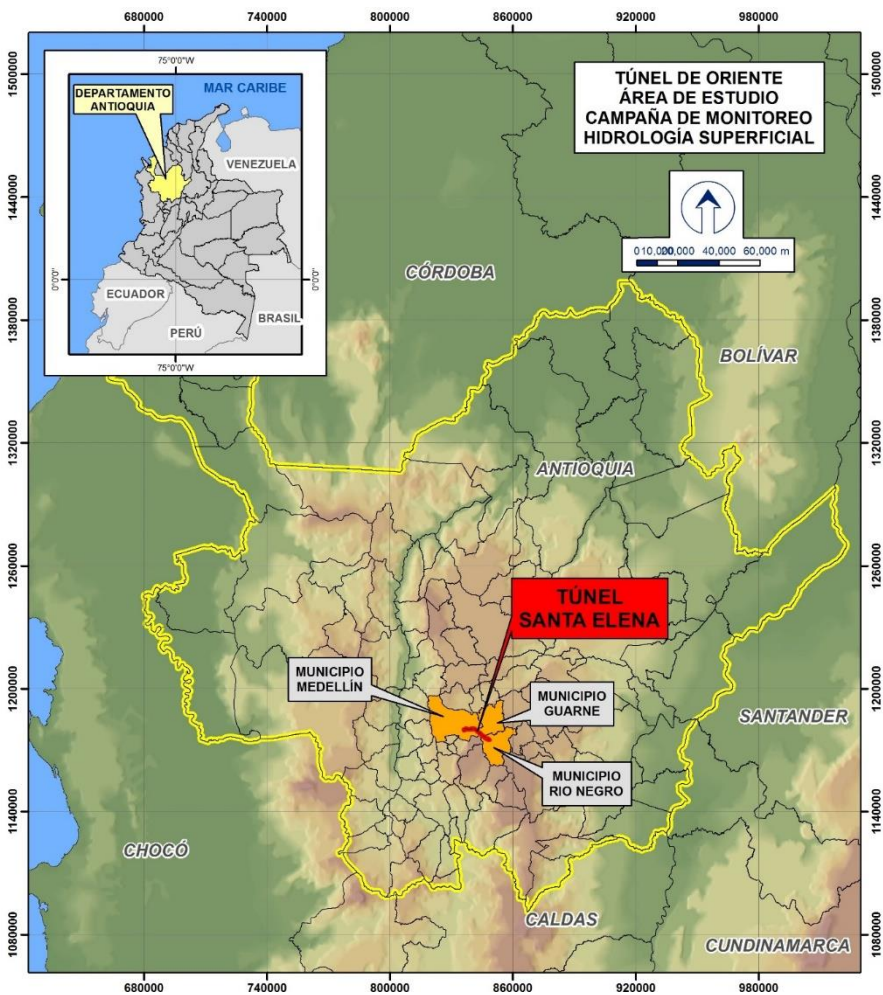
2. LA FASE DE ESTUDIOS

- ✓ Investigaciones realizadas
- ✓ Inventario de puntos de agua subterránea
- ✓ Modelo geológico y geofísico de referencia
- ✓ Modelo hidrogeológico conceptual
- ✓ Drawdown Hazard Index (DHI)
- ✓ Simulación numérica (Feflow – 2D).

3. SEGUIMIENTO DURANTE LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL

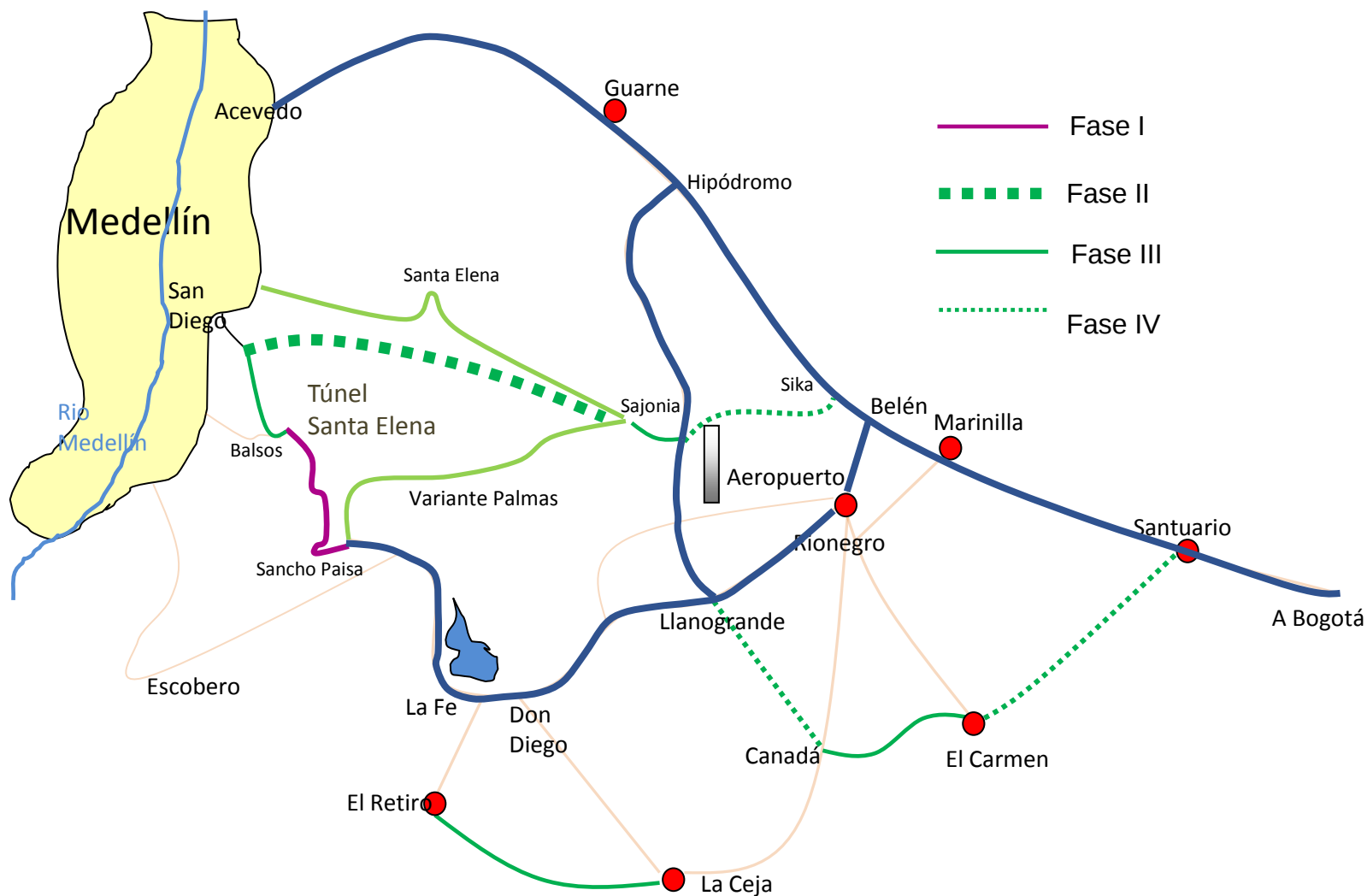
- ✓ Datos de avance y rendimientos
- ✓ Hidrología superficial vs. Excavación del túnel
- ✓ Caudales de infiltración vs. Manantiales
- ✓ Caudales de infiltración vs. Quebradas
- ✓ Caudales de infiltración vs. Piezómetros
- ✓ Isotopía durante la excavación

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

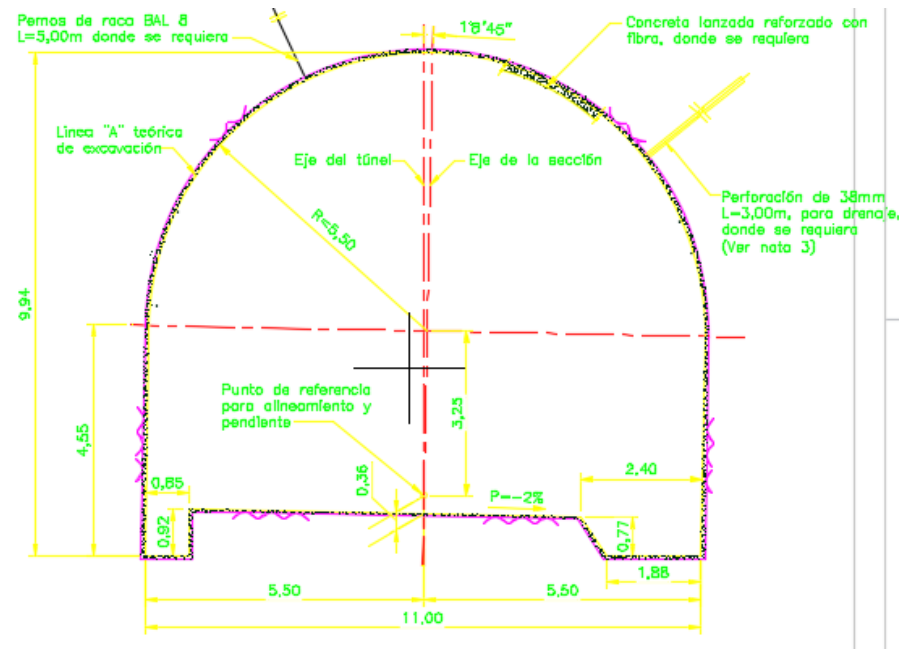


✓ Localización del túnel





Vialidad entre los Valles de Aburrá y San Nicolas



TRATAMIENTO: Pernos de roca y concreto lanzado reforzado con fibras donde se requieran

TERRENO TIPO B

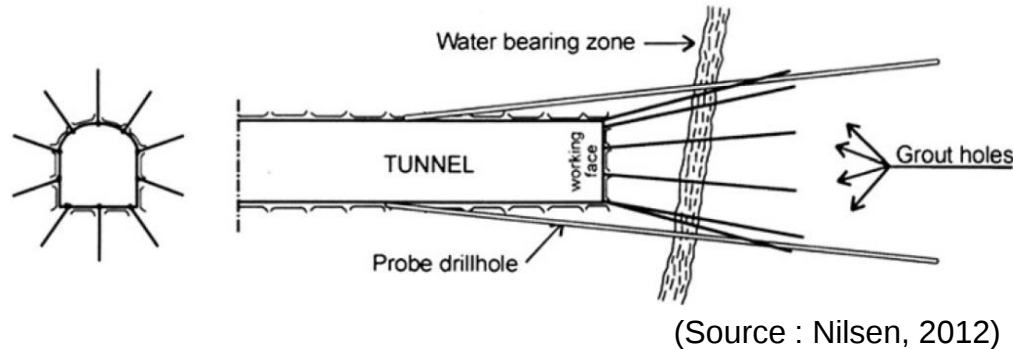
✓ Características principales del Túnel Santa Elena:

Incluye soporte primario y revestimiento definitivo por cada tipo de terreno (B,C,D,E,F)

Todas las secciones tipo son drenantes

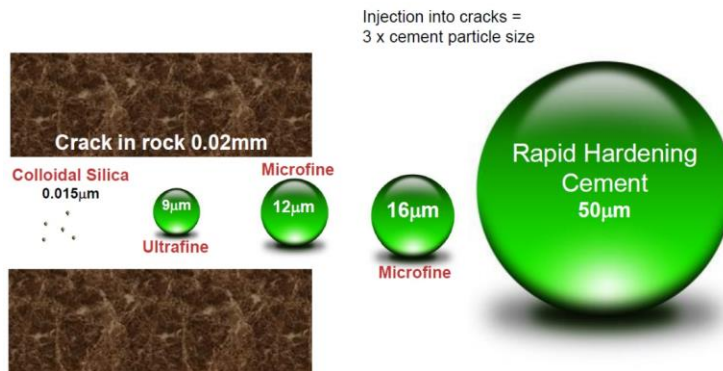
Descripción	TUBO 1	TUBO 2
Sección transversal	90 m ²	72 m ²
Ventilación	Semi-transversal	Longitudinal
Longitud total	8215 m	8202 m
Máxima cobertura	500 m	500 m
Pendiente promedio	2,25%	2,25%
Uso	Vial	Servicio/Seguridad

PRE-INYECCIONES: IMPERMEABILIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

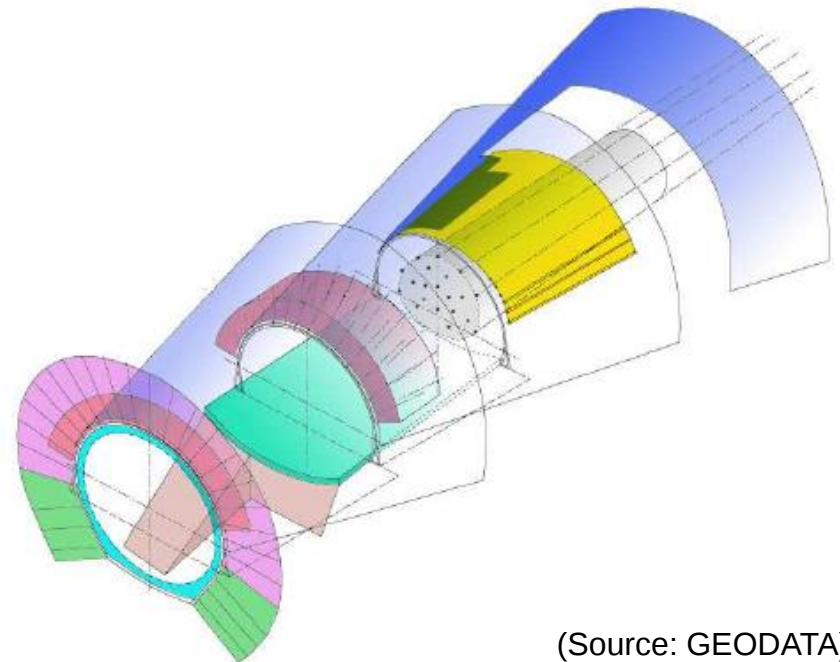


(Source : Normet)

El tamaño de la partícula



- Cemento Portland/ Cemento tipo III
- Micro cemento
- Resinas bi-componentes / sílica coloidal.



(Source: GEODATA)

FASE DE ESTUDIOS: Investigaciones Geológicas e Hidrogeológicas

HASTA EL AÑO 2012			
TIPO	Cantidad	Unidad	Descripción/Observación
Sondeos mecánicos	2865	m.l.	1330 m.l. para instalación de piezómetros
Prospección geofísica	530	m.l.	Refracción Sísmica
	5000	m.l.	Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V)
Análisis petrográficos	20	U	Petrografía sobre sección delgada
Piezómetros	22	U	Ninguna
Inventario Puntos de Agua	207	Ptos	Se identifican y describen los puntos de agua, sin datos de caudal o parámetros físico-químicos
Mediciones caudal Agua superficial	104	Ptos	Total puntos de monitoreo sobre todo el corredor vial.
Estudio Flujos Subterráneos	1	U	Utilización de trazadores (Oxígeno 18 y Deuterio)
Permeabilidad	Varias	U	Pruebas de permeabilidad en roca y en Laboratorio

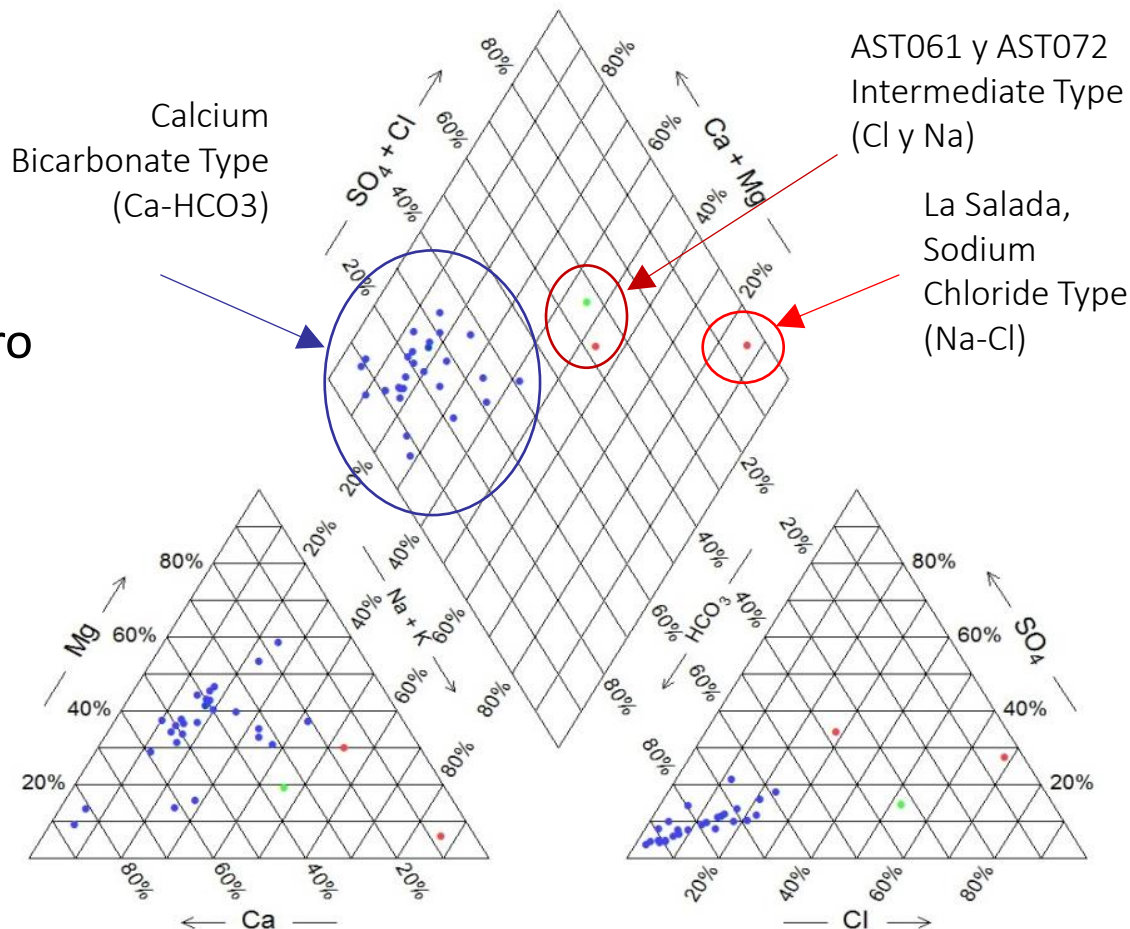
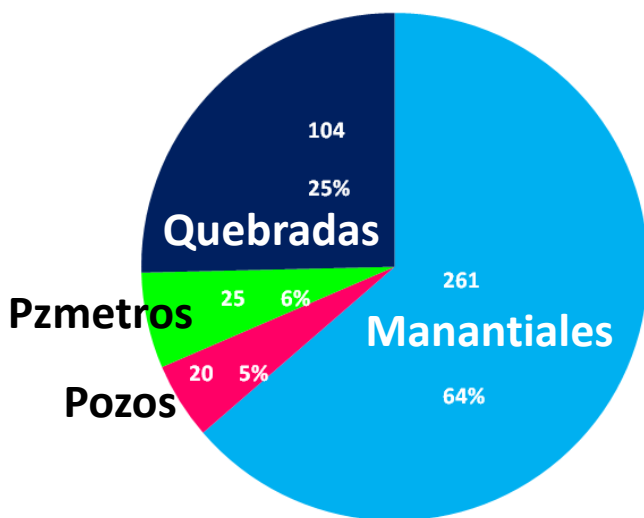
FASE DE ESTUDIOS: Investigaciones Geológicas e Hidrogeológicas

2013 - 2014			
TIPO	Cantidad	Unidad	Descripción/Observación
Sondeos mecánicos	358	m.l.	Todos usados para Piezómetros.
Prospección geofísica	7300	m.l.	Tomografía Eléctrica, se cubrió el 90 % del túnel superficie y hasta 60 m de profundidad.
	85	U	Sondeos AMT, se cubrió todo el desarrollo del túnel tanto en superficie como en profundidad.
Análisis petrográficos	16	U	Petrografía sobre sección delgada
Piezómetros	7	U	2 en el basamento rocoso y 5 en terrenos de cobertura
Inventario Ptos de Agua	410	Ptos	La información de cada punto de agua se recopila de acuerdo a formato FUNIAS.
Pruebas Bombeo	8	U	Ocho pruebas de bombeo
Lugeon	20	U	Pruebas de permeabilidad tipo Lugeon en roca

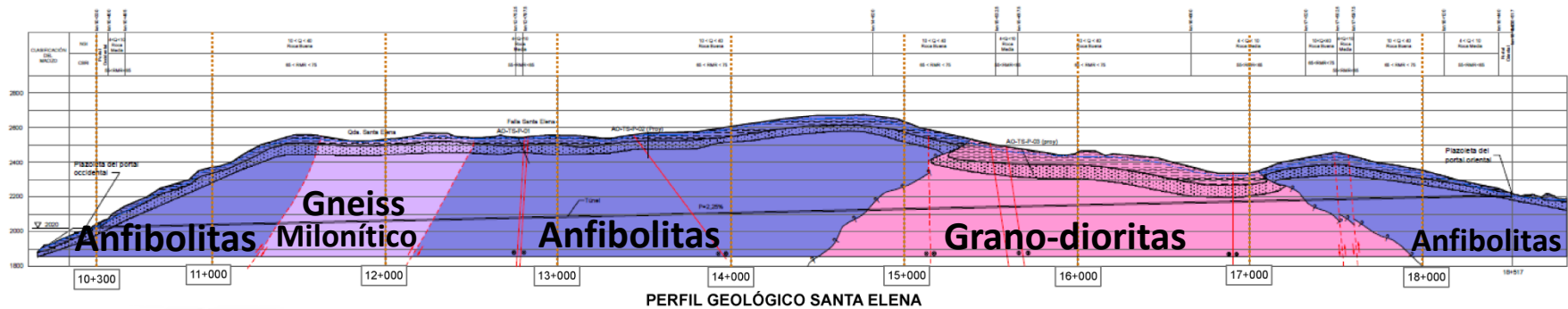
✓ Inventario de puntos de agua

410 Ptos de agua

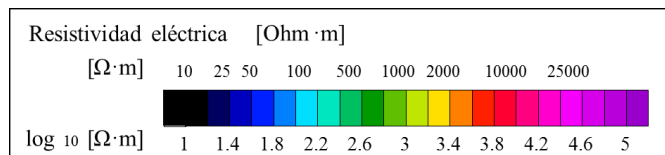
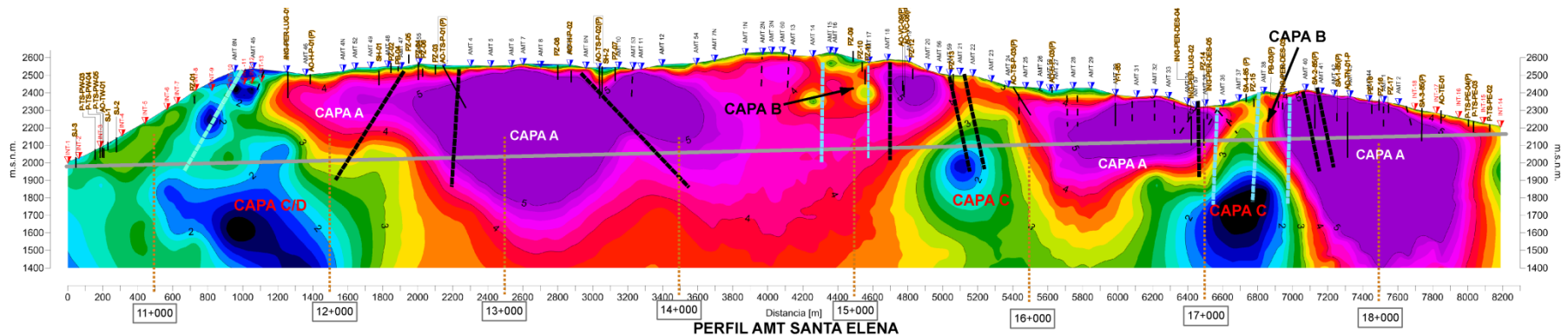
- ✓ Baja mineralización
- ✓ Sistema de flujos superficiales
- ✓ Poca residencia en el acuífero

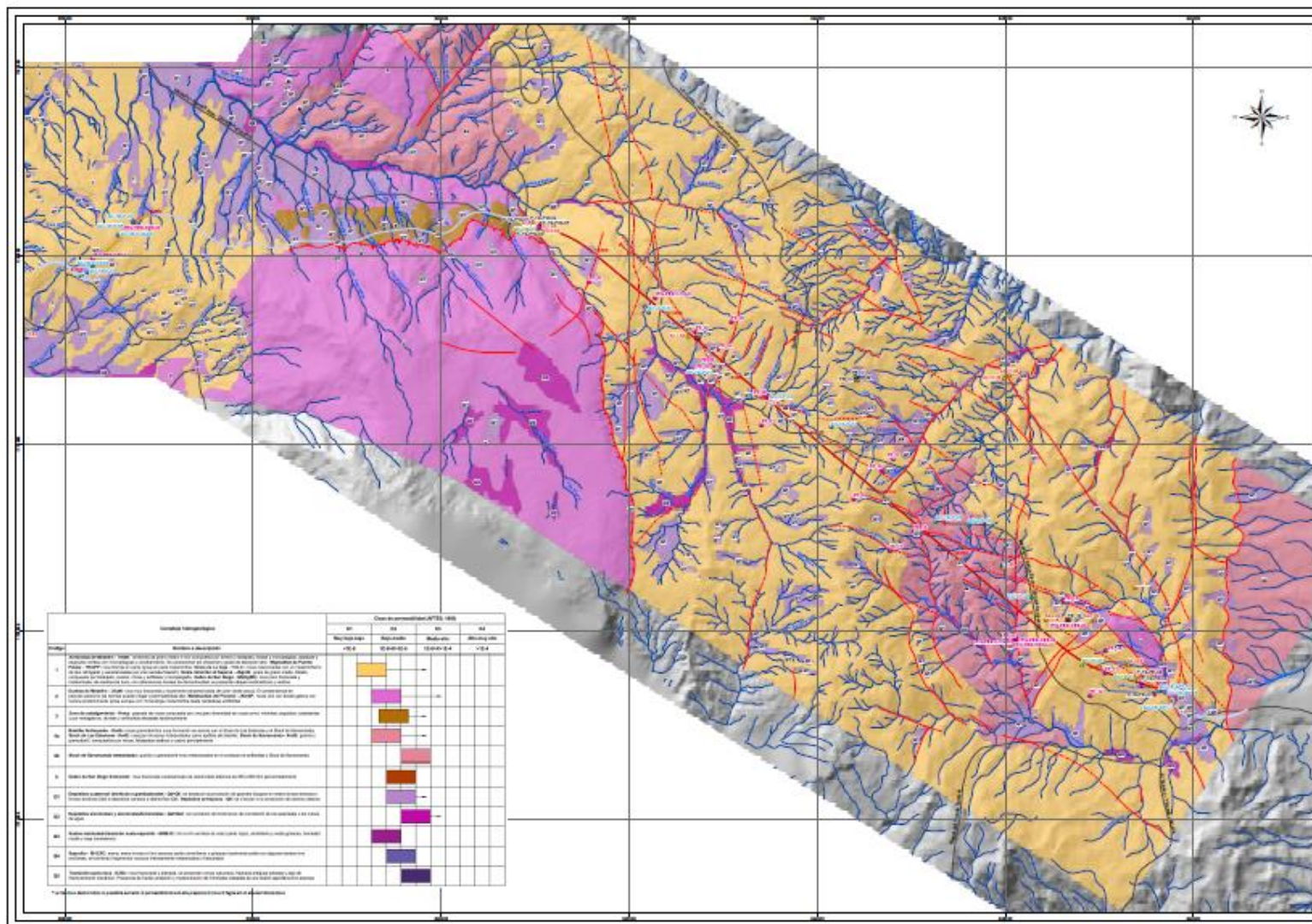


Modelo Geológico de referencia 2012



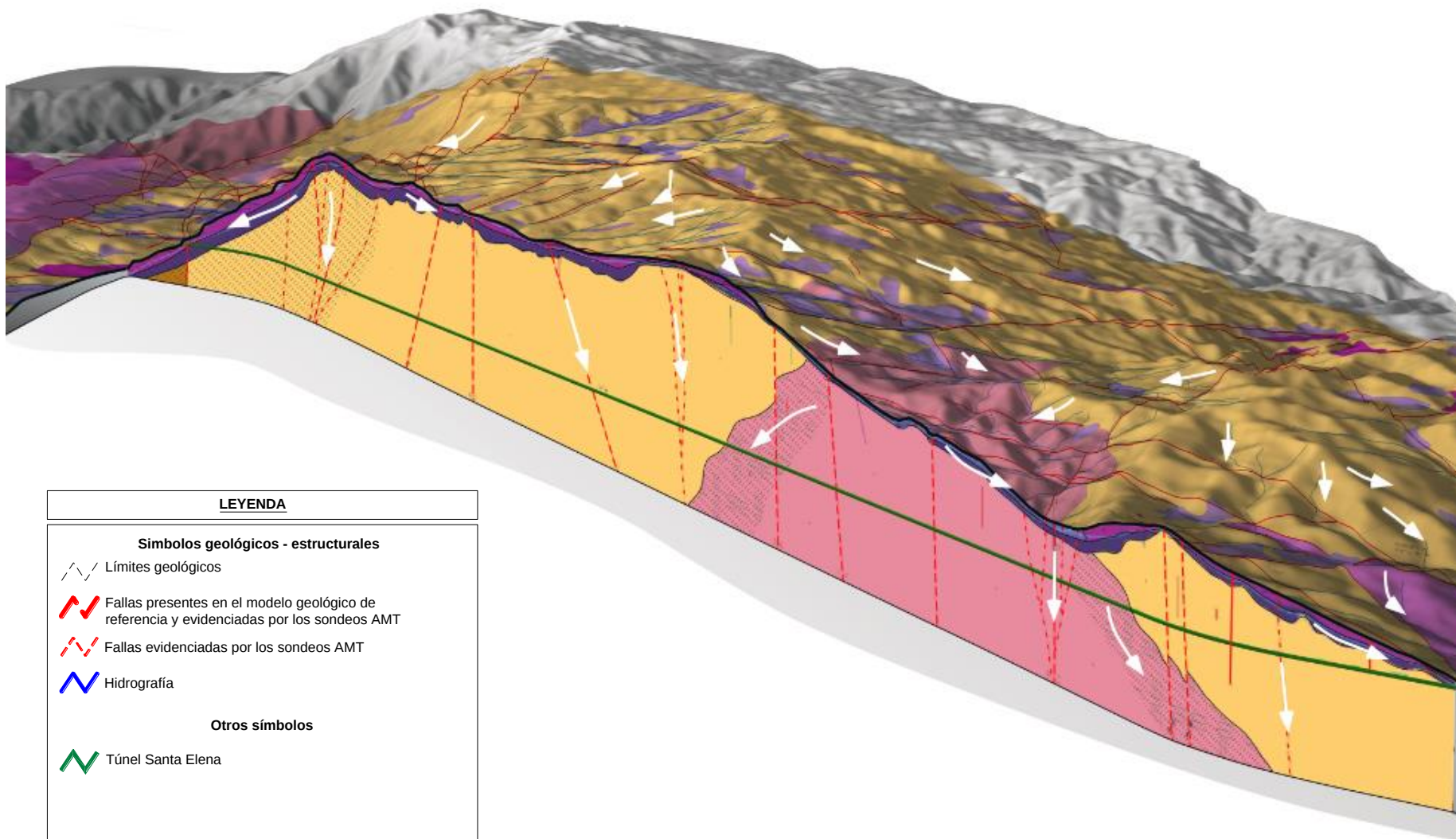
Modelo geofísico – Investigaciones AMT 2014



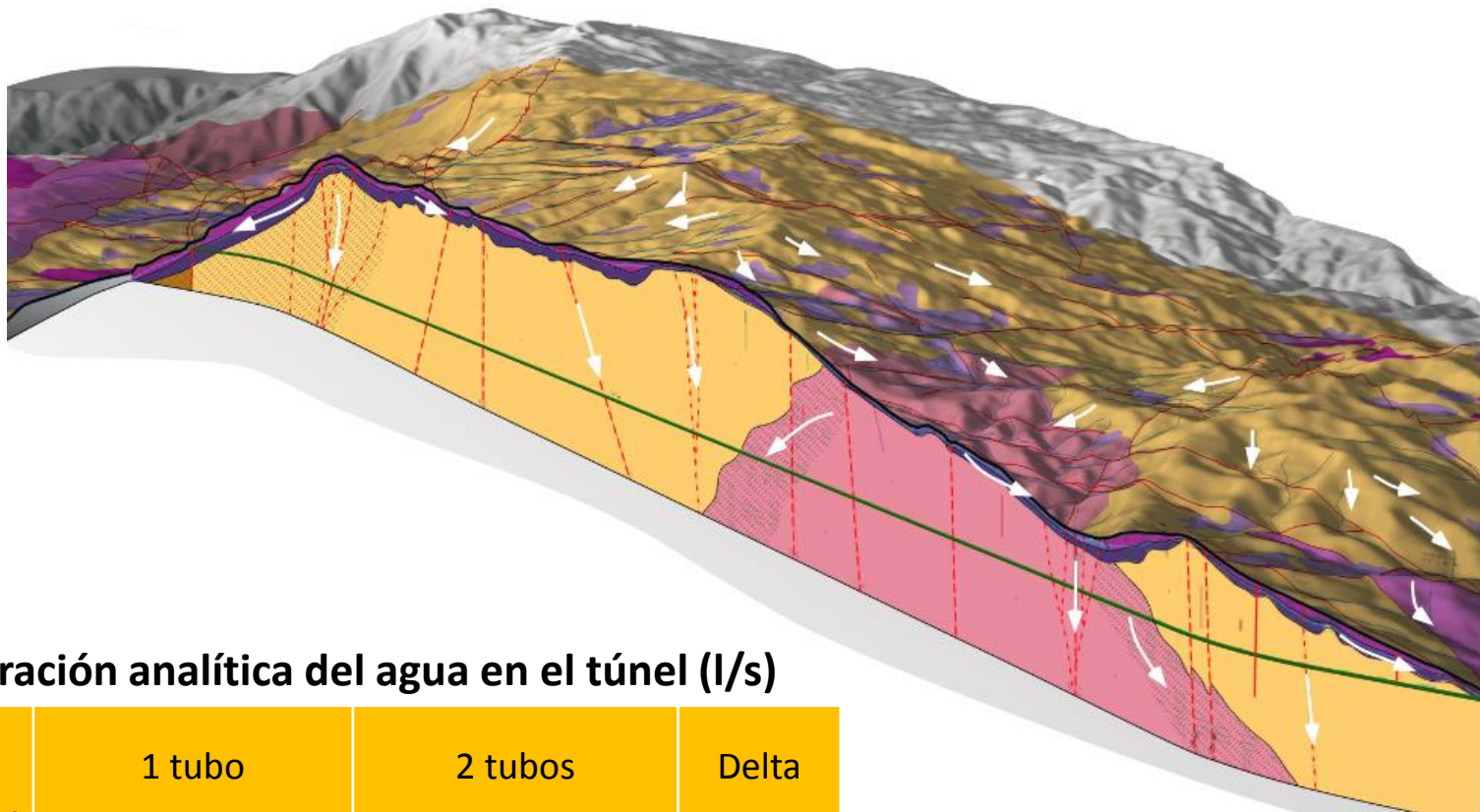


Complejo hidrogeológico		Clase de permeabilidad (AFTES, 1992)							
		K1		K2		K3		K4	
		Muy bajo-bajo	Bajo-medio	Medio-alto	Alto-muy alto				
Código	Nombre e descripción	<1E-8	1E-8>K>1E-6	1E-6>K>1E-4	>1E-4				
1	Anfibolitas de Medellín - TRaM: anfibolita da grano medio a fino compuesta por anfíbol y feldspato, foliada y microplegada, diabasas y esquistos verdes con microplegues y cizallamiento. Se caracterizan por presentar un grado de alteración alto; Migmatitas de Puente Peláez - TRmPP: roca híbrida en parte ígnea en parte metamórfica; Gneis de La Ceja - TrnLC: rocas relacionadas con un metamorfismo de tipo retrógado y caracterizadas por una marcada foliación; Gneis miloníticos de Sajonia - JKgmS: gneis de grano medio, foliado, compuesto por feldspato, cuarzo, micas y anfíboles y microplegado; Gabro de San Diego - IIA(KgSD): roca poco fracturada y meteorizada, de resistencia dura, con alteraciones locales de discontinuidad, se presentan diques centimétricos y venillos								
2	Dunitas de Medellín - JKuM: roca muy fracturada y localmente serpentizada de color verde oscuro. En presencia de pseudo-carstismo las dunitas pueden llegar a permeabilidad alta; Metabasitis del Picacho - JKmbP: rocas que van desde gabros con textura predominante ígnea aunque con mineralogía metamórfica-hasta verdaderas anfibolitas								
3	Zona de cabalgamiento - Kmce: paquete de rocas compuesta por una gran diversidad de rocas como: milonitas, esquistos, catácitas y por metagabros, dunitas y anfibolitas afectadas tectónicamente								
4a	Batolito Antioqueño - KcdA: rocas granodiorítica cuya formación se asocia con el Stock de Las Estancias y el Stock de Samarcanda; Stock de Las Estancias - KcdE: cuerpos intrusivos interpretados como apófisis del batolito; Stock de Samarcanda - KcdS: granito y granodiorita, compuestos por micas, feldspatos sódicos y cuarzo principalmente								
4b	Stock de Samarcanda meteorizado: granito y granodiorita muy meteorizados en el contacto tra anfibolitas y Stock de Samarcanda								
5	Gabro de San Diego fracturado: roca fracturada caracterizada da resistividad eléctrica da 300 a 800 Ωm aproximadamente								
Q1	Depósitos cuaternari detriticos e gravitacionales - Qd+Qf: se destacan acumulación de grandes bloques en matriz limoso-arenosa e limoso-arcilloso (Qd) e depositos conexos a debris-flow (Qf); Depósitos antrópicos - Qll: se vinculan a la ampliación de centros urbanos								
Q2	Depósitos aluvionales y aluvionales/torrenciales - Qal+Qat: son producto de fenómenos de inundación de las quebradas o los cursos de agua								
Q3	Suelos residuales/transición suelo-saprolito - IB/IB-IC: limo e limo arcilloso de color pardo rojizo, amarillento y verde grisáceo, humedad media y baja consistencia								
Q4	Saprolito - IB-IC/IC: arena, arena limosa e limo arenoso pardo amarillento a grisáceo localmente suelto con algunas bandas limo arcillosas, envolviendo fragmentos rocosos intensamente meteorizados y fracturados								
Q5	Transición suelo-roca - IC/IIA: roca fracturada y alterada, se presentan venas calcareas, fracturas antiguas selladas y algo de fracturamiento mecánico. Presencia de fuerte oxidación y meteorización de minimales rodeadas de una matriz saprolítica limo arenosa								

Modelo Hidrogeológico Conceptual - 2014



Modelo Hidrogeológico Conceptual - 2014



Valoración analítica del agua en el túnel (l/s)

Pre- inyección	1 tubo		2 tubos		Delta
	MIN	MAX	MIN	MAX	(%)
Sin	132	221	159	266	17%
Con	53	63	63	72	11,84
Delta (%)	-60%	-71%	-60%	-73%	-

Zonas de falla y zonas fracturadas

Zonas de Fallas	1144 m
Zonas Fracturadas	2323 m
Total	3467 m

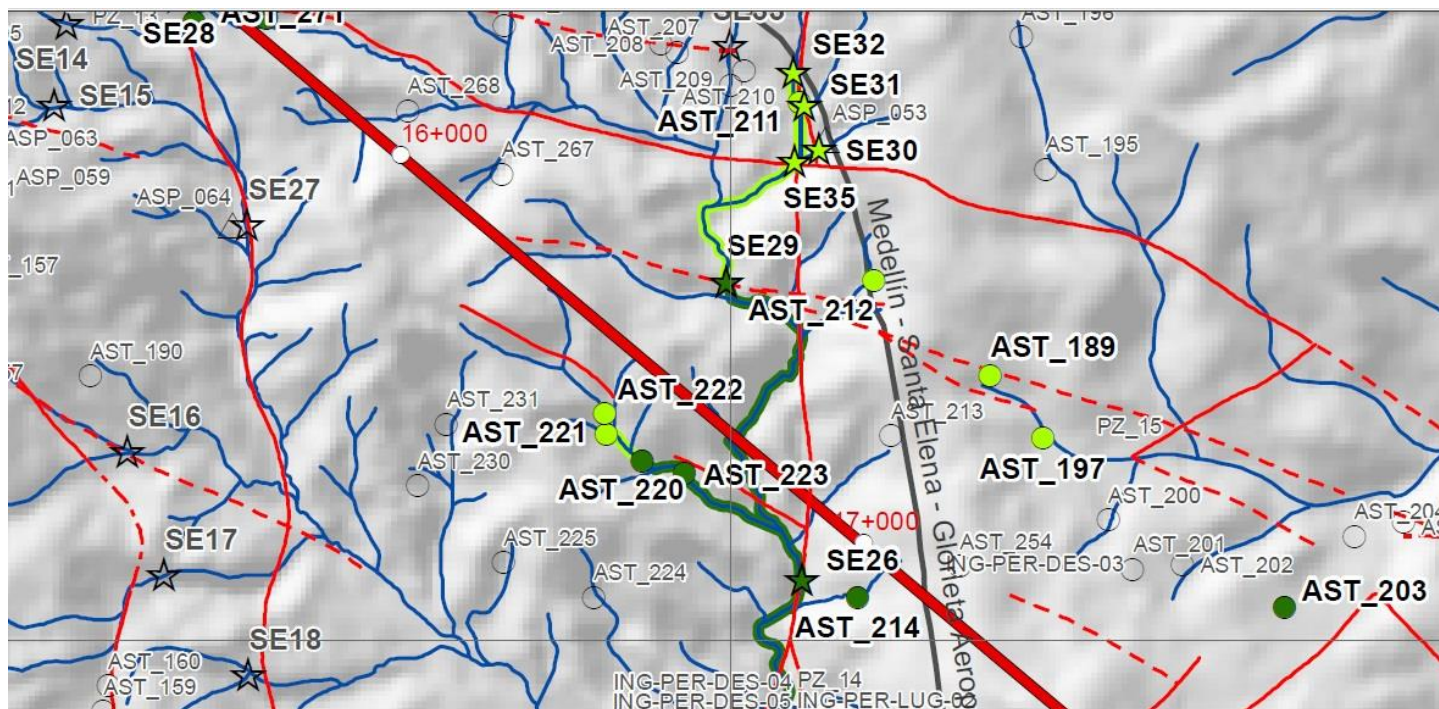
Métodos de análisis - probabilidad de afectación Ptos de Agua

✓ Drawdown Hazard Index (Método DHI)

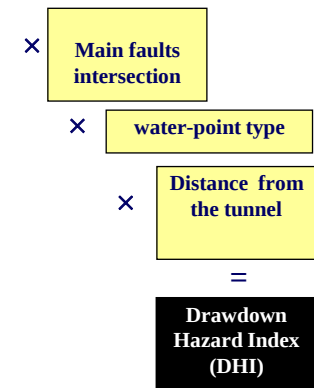
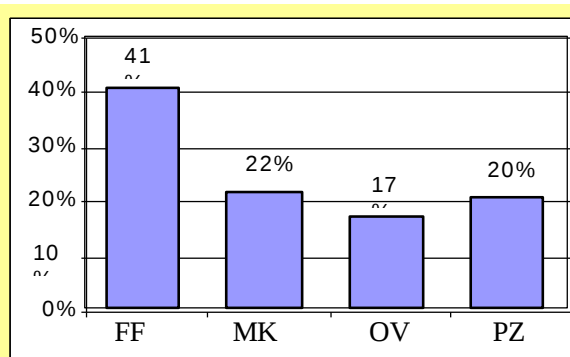
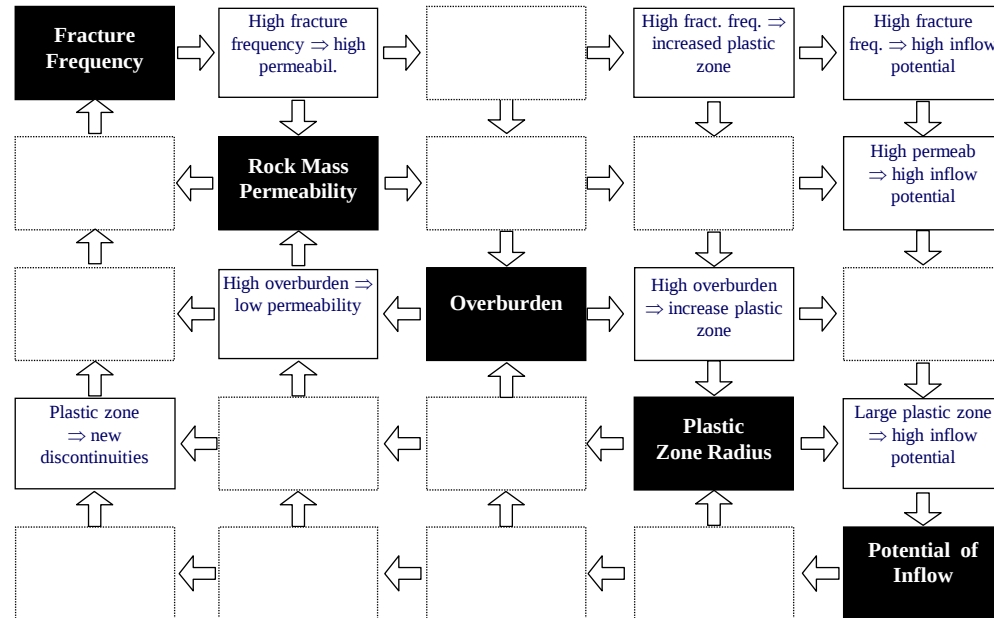
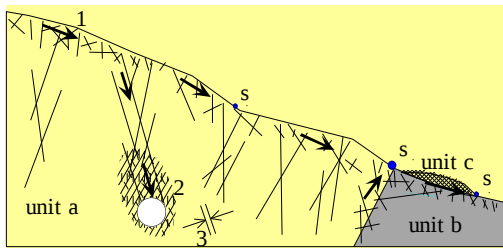
Indice de probabilidad de secamiento de los puntos de agua (Metodo DHI)

PUNTO DE AGUA		Probabilidad	Valor DHI	Clase DHI
superficial	subterráneo			
△ ☆	○ ☒	despreciables	< 0.16	1
▲ ☆	● ☒	baja	0.16 - 0.24	2
▲ ☆	● ■	medio/alta	> 0.24	3

 Tramo de río con una probabilidad baja de reducción de caudal
 Tramo de río con una probabilidad medio/alta de reducción de caudal



✓ Drawdown Hazard Index (Método DHI)



$$DHI = (41 \cdot FF + 22 \cdot MK + 17 \cdot OV + 20 \cdot PZ) \cdot IF \cdot ST \cdot DT$$

✓ **Drawdown Hazard Index (Método DHI)**

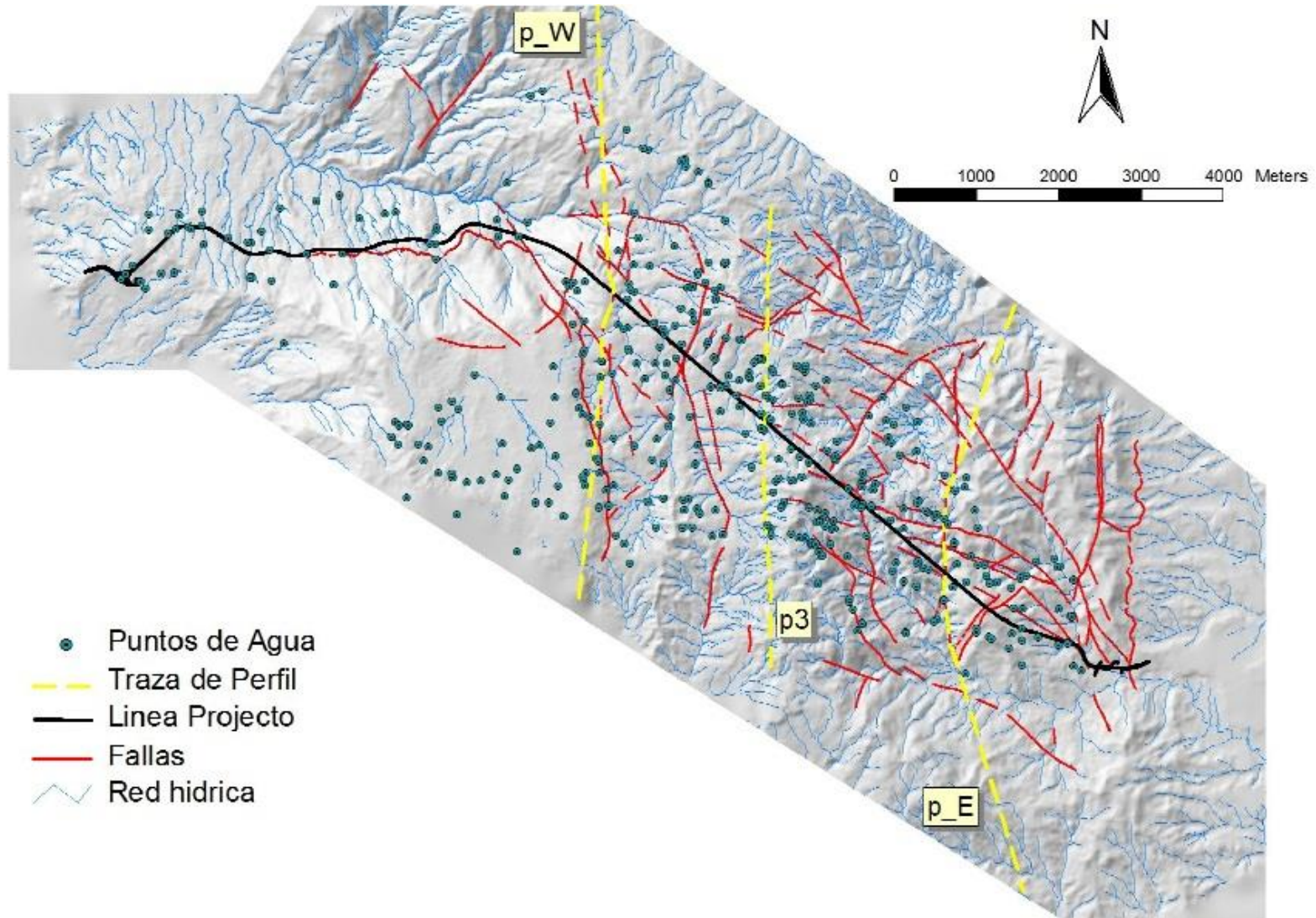
RESULTADOS MANANTIALES

Pre- inyecc iones	Despreciable		Baja		Media a alta	
	(DHI 1)		(DHI 2)		(DHI 3)	
	N.	%	N.	%	N.	%
Sin	234	85%	28	10%	13	5%
Con	275	100%	0	0	0	0

RESULTADOS QUEBRADAS

Pre- inyecci ones	Despreciable		Baja		Media a alta	
	(DHI 1)		(DHI 2)		(DHI 3)	
	km	%	Km	%	km	%
Sin	131,34	92%	10,18	7%	1,58	1%
Con	143,3	100%	0	0%	0	0%

✓ Modelo numérico de flujo - 2D (Feflow)

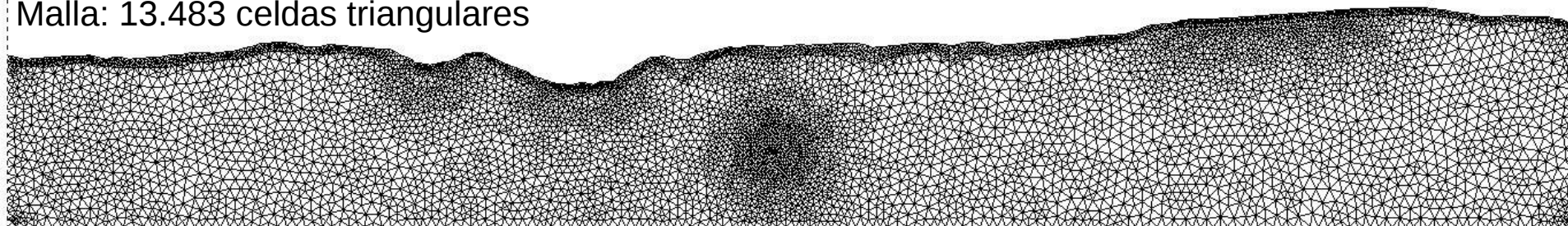


MODELO NUMÉRICO DE FLUJO con los siguientes escenarios de simulación:

- ✓ Condición “ante-operam”, sin los túneles (fase de calibración del modelo)
- ✓ Condición con los túneles construidos:
 - 1 tubo sin pre-inyecciones (túnel drenante)
 - 1 tubo con pre-inyecciones
 - 2 tubos, sin pre-inyecciones (túnel drenante)
 - 2 tubos con pre-inyecciones

Formación	K (m/s)
Depositos cuaternarios (Q)	1E-6
Suelo residual (Q3) - Limos y limos-arcillosos	1E-7
Saprolito (Q4) – Arena limosa y limos arenosos	5E-7
Transición suelo / roca (Q5) – Roca alterada y fracturada	5E-7
Falla (4b y 5)	3E-7

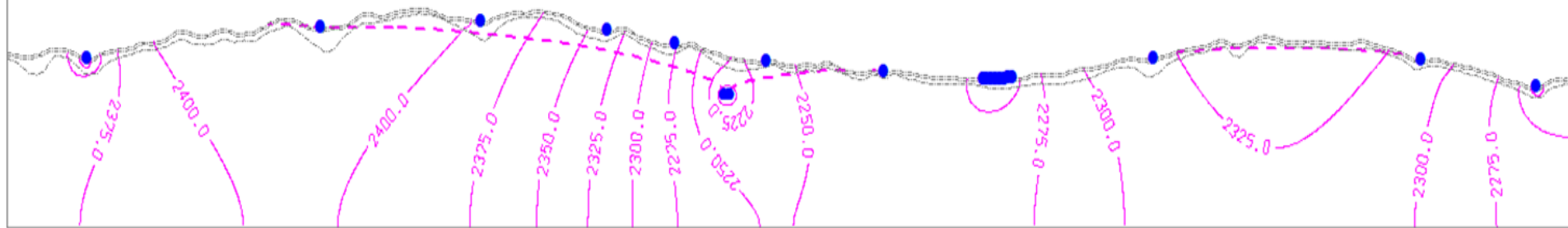
Malla: 13.483 celdas triangulares



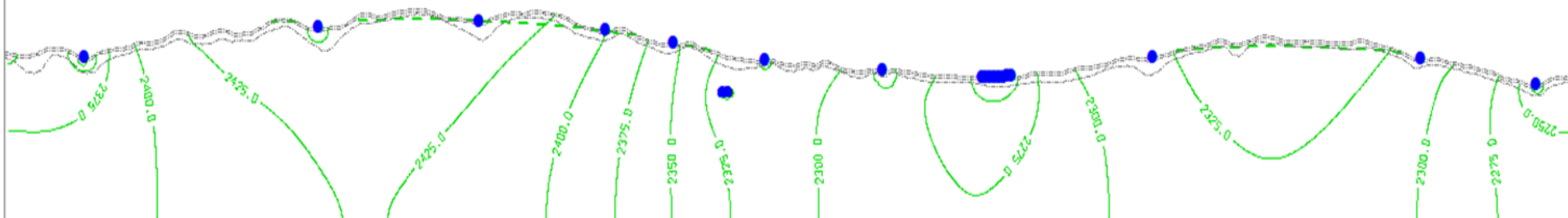
Sección en zona de falla, Granodioritas (Stock de Samarcanda)

Superficie piezométrica deformada por efecto del drenaje de 2 tubos

Sin pre-inyecciones

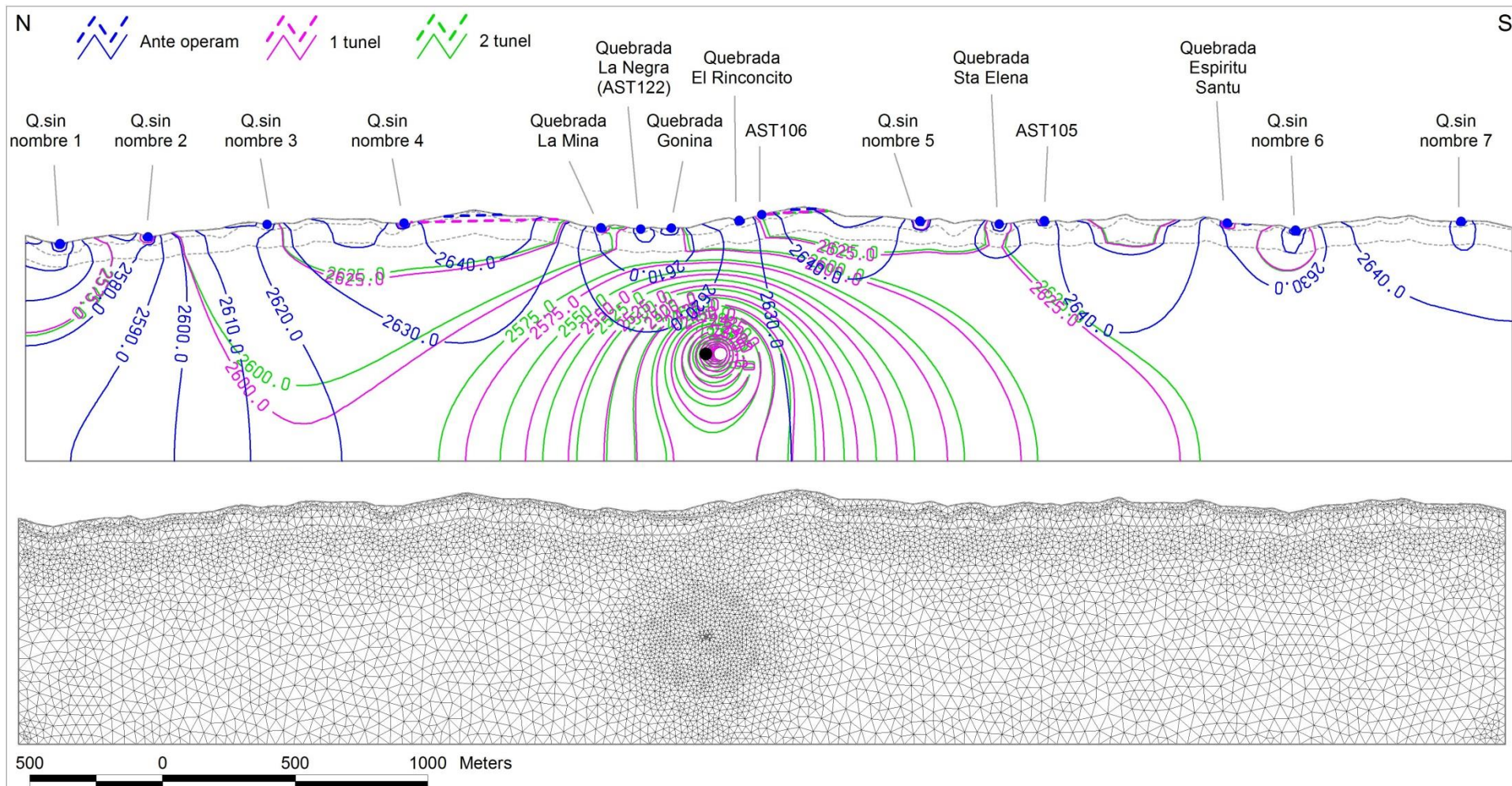


Con pre-inyecciones



Caudal límite de flujo con Pre-Inyecciones: 0,5 l/s/100m (30 l/min/100 m de túnel)

Sección en roca sana (sin fallas ni fracturas), Anfibolitas No necesita Pre-Inyección

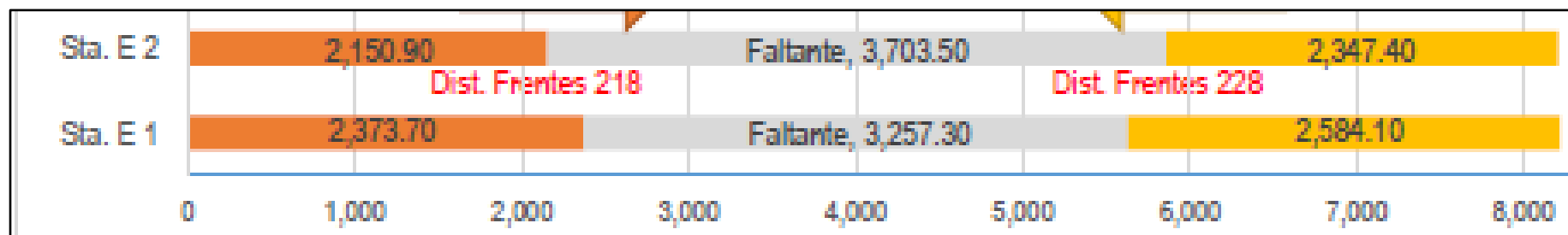


FASE CONSTRUCTIVA: Seguimiento durante la excavación del túnel

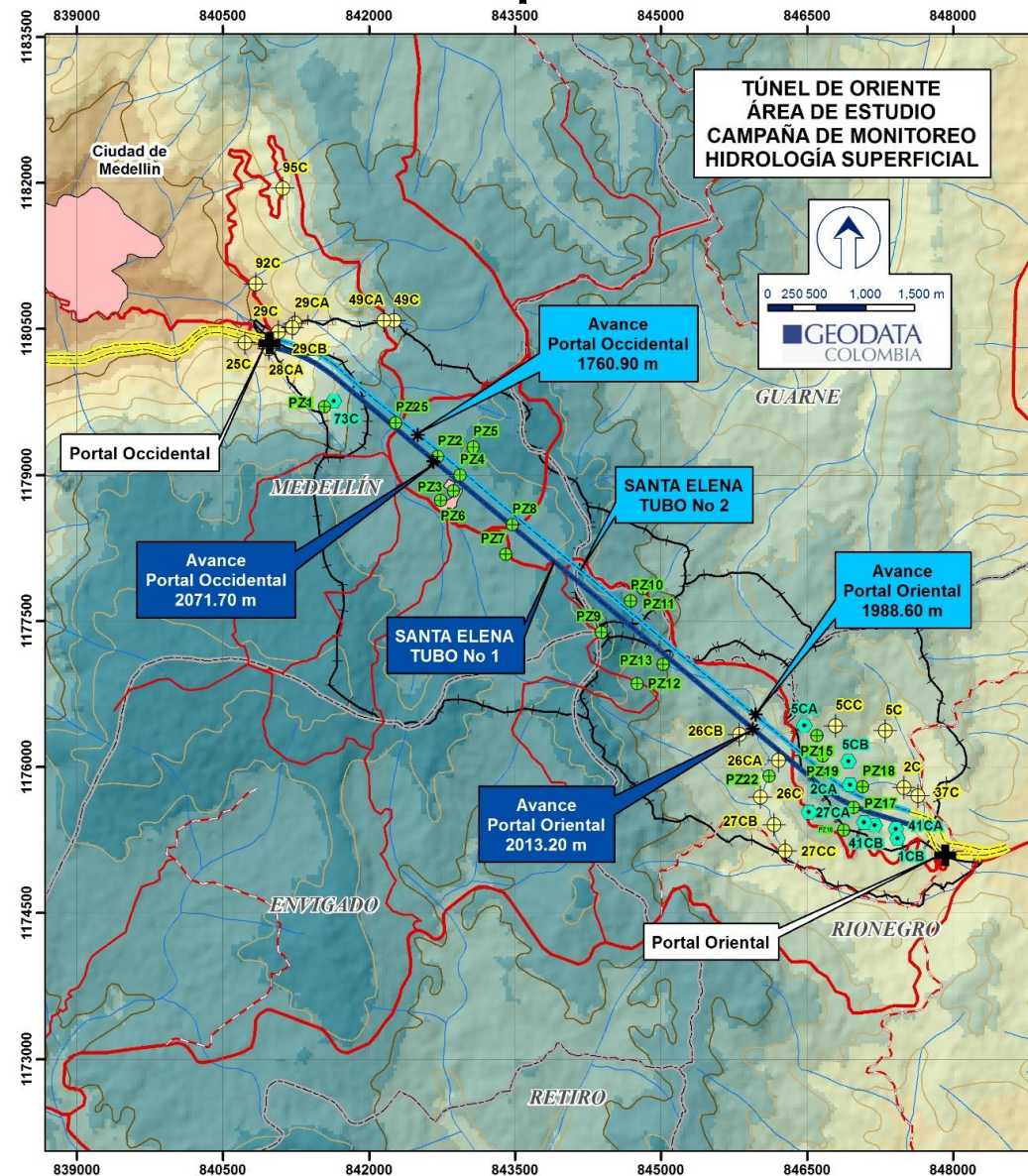


FASE CONSTRUCTIVA: Seguimiento durante la excavación del túnel

DESCRIPCIÓN	SANTA ELENA TUNEL – DATA AL 30/07/17					
	TUBO 1			TUBO 2		
	Portal W	Portal E	Total	Portal W	Portal E	Total
Fecha de inicio	09/06/15	12/01/15		14/08/15	19/04/15	
P.K. Inicial	10+306	18+521	8.215	10+311	18+512	8.202
P.K. al 30/07/17	12+378	16+508		12+072	16+524	
Avance diario (m)	6,00	2,50	8,50	3,91	5,10	9,01
Avance última semana (m)	21,60	23,60	45,20	25,90	29,70	55,60
Avance último mes (m)	40,60	62,60	103,20	70,70	70,80	141,50
Avance acumulado (m)	2.374	2.584	4.958	2.151	2.347	4.498
Porcentaje de avance (%)			60,4%			54,8%



✓ Monitoreo Precipitación



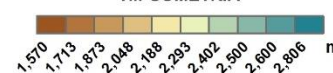
CONVENCIONES GENERALES

- Via Tipo 1
- Via Tipo 2
- Via Tipo 3
- Via Tipo 4
- Limite Municipal
- Centro pabaldo
- Curva Indice
- Curva Intermedia

PUNTOS DE MONITOREO

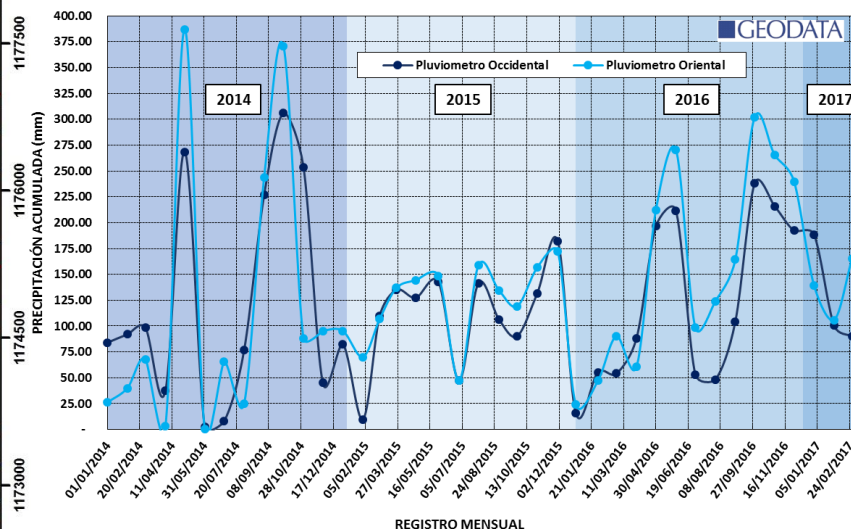
- ⊕ QUEBRADA
- ⊕ MANANTIAL
- ⊕ PIEZOMETRO
- ⊕ PLUVIOMETRO

HIPSOMETRIA



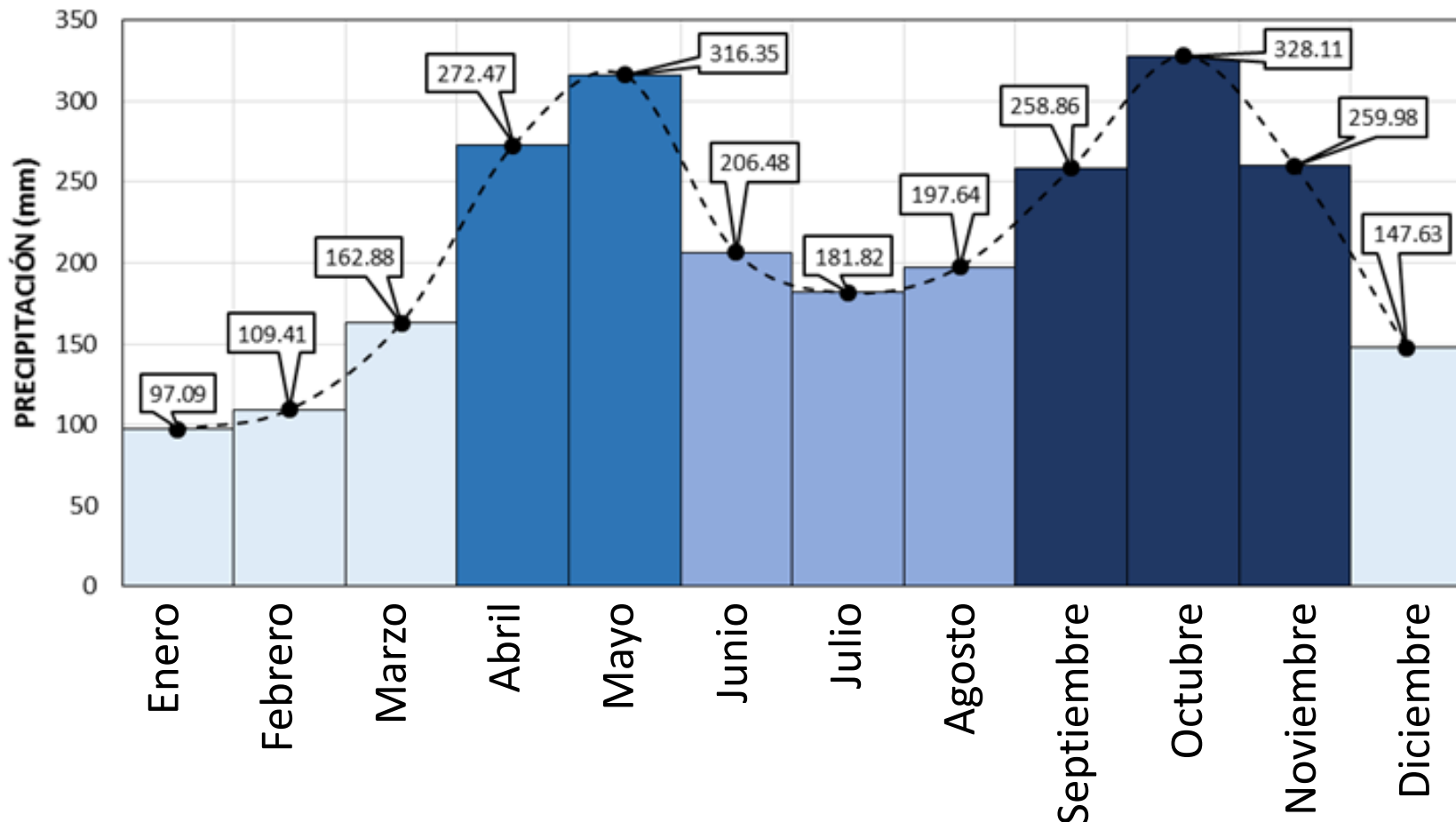
Nota: Datos de avance ilustrados hasta el 22/03/17

Monitoreo Lluvia “in situ”



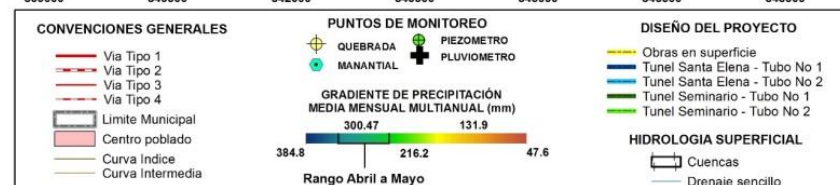
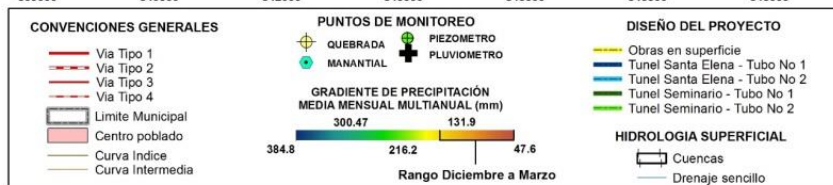
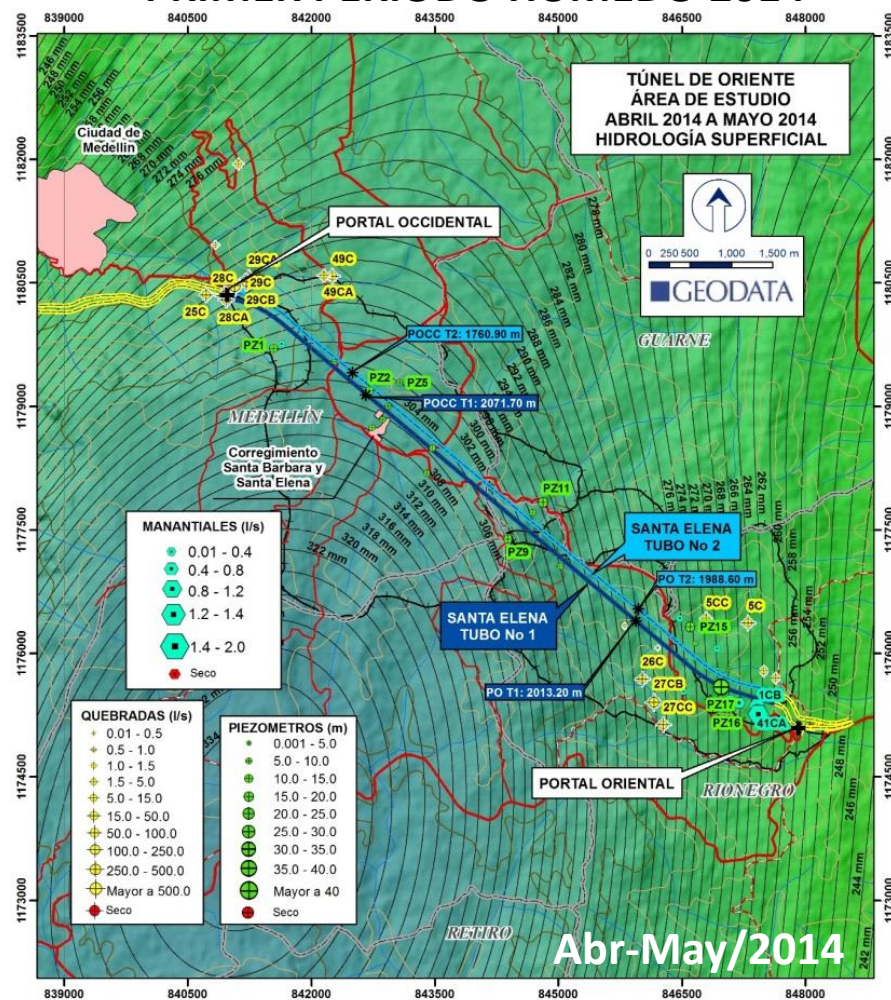
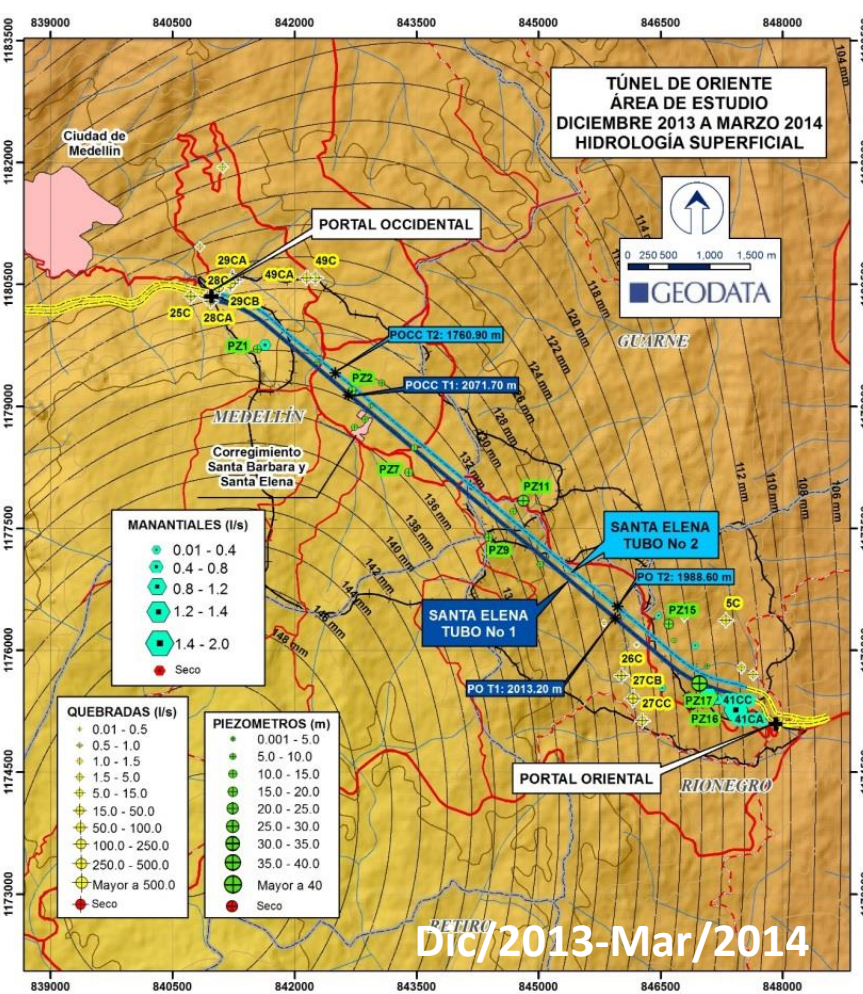
✓ Monitoreo hidrología superficial

Promedio de lluvias mensuales – Régimen Bi-modal

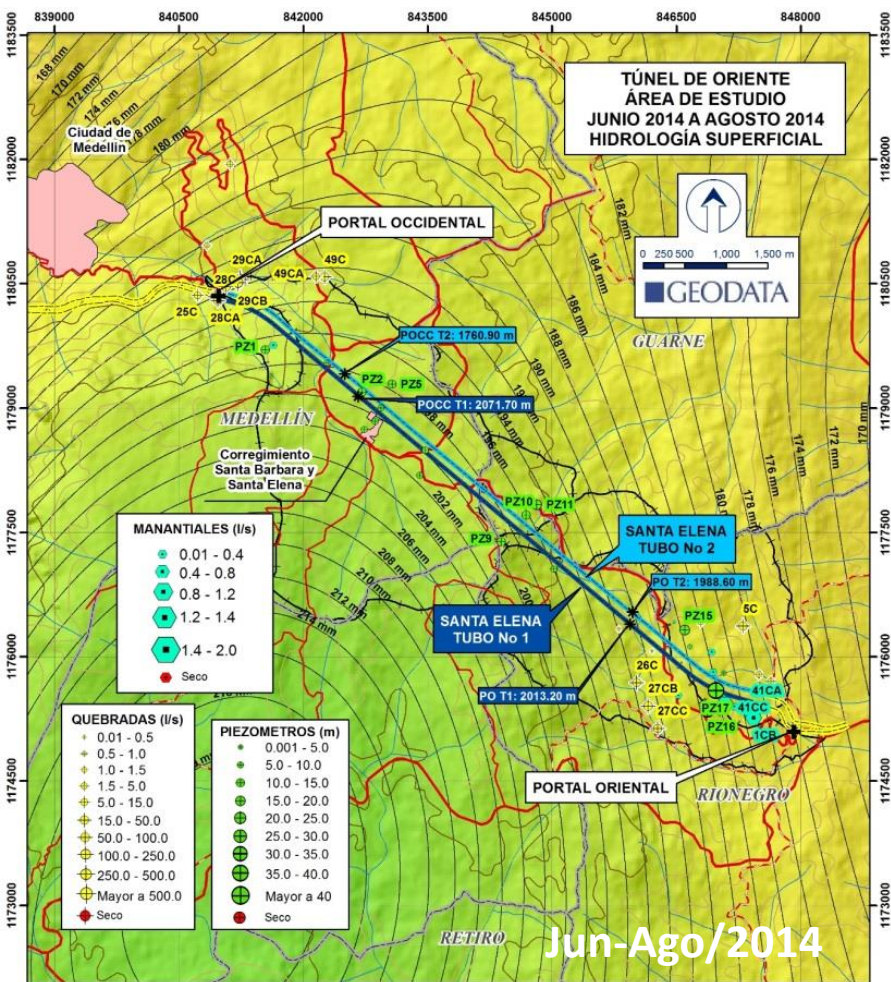


PRIMER PERIODO SECO 2013-2014

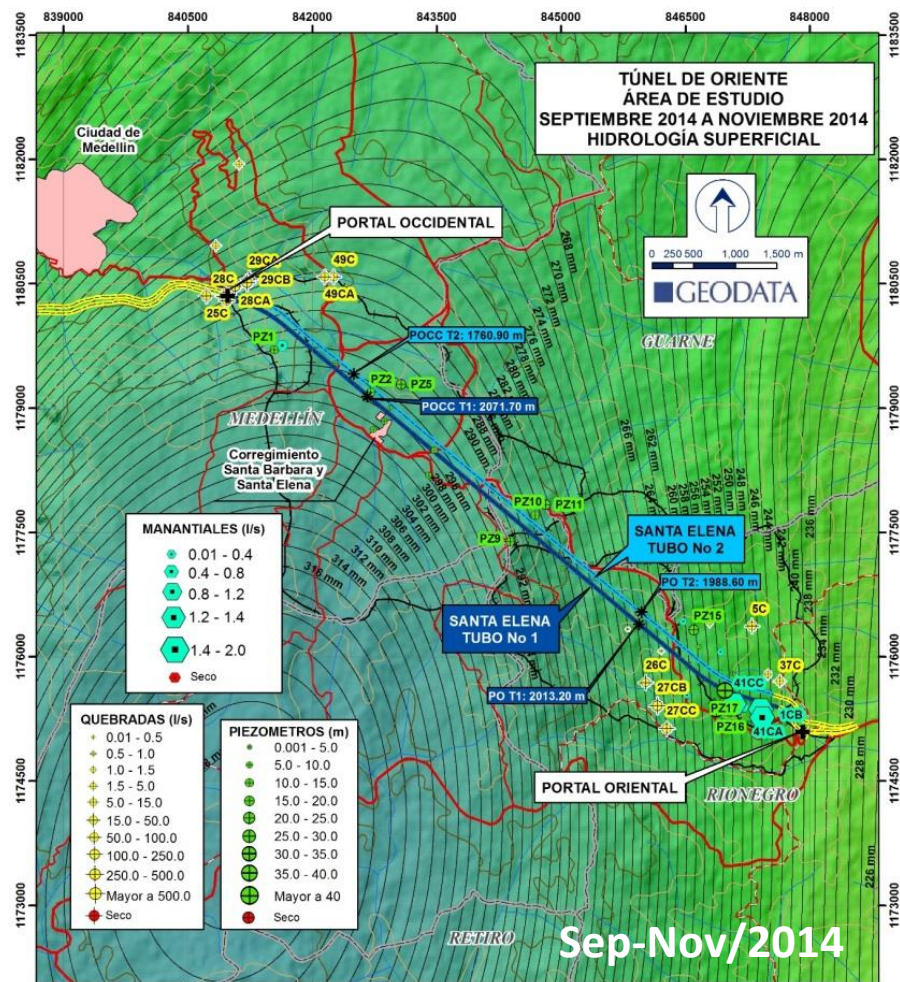
PRIMER PERIODO HÚMEDO 2014



SEGUNDO PERIODO SECO 2014

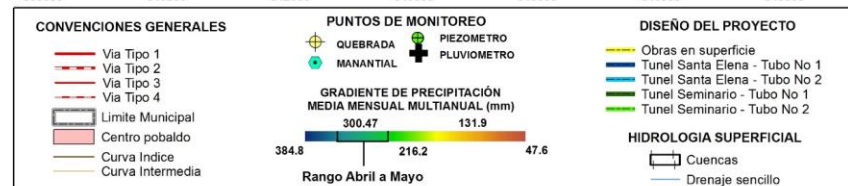
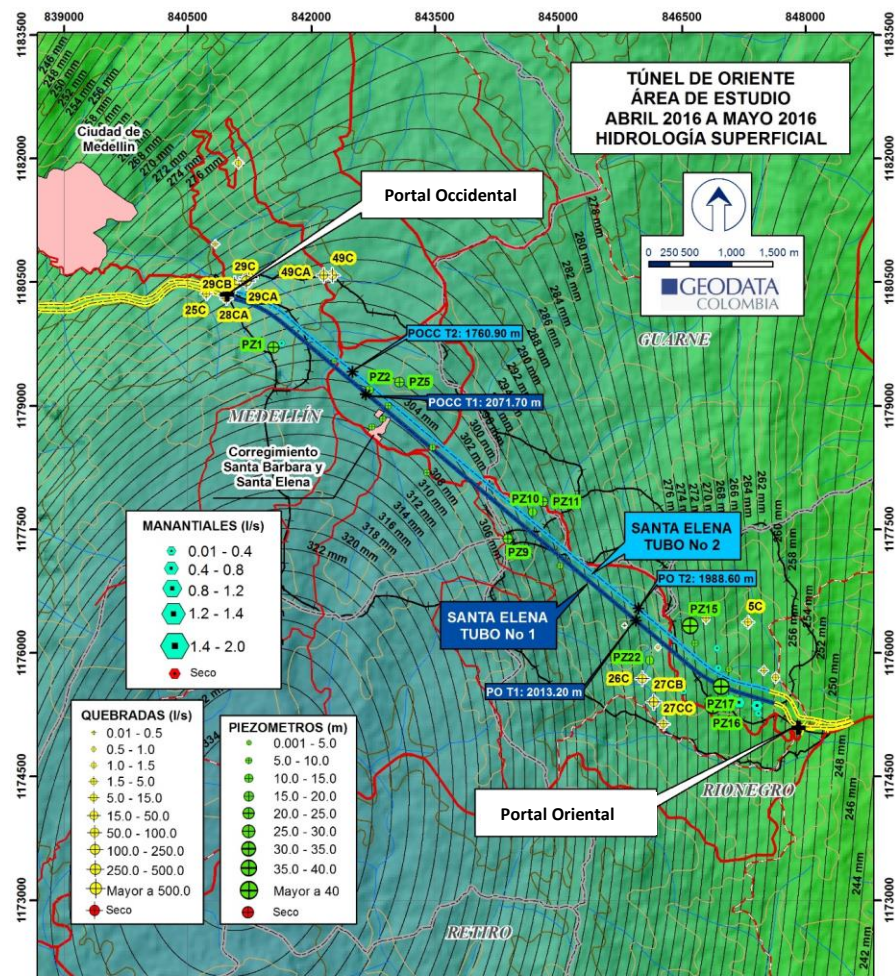
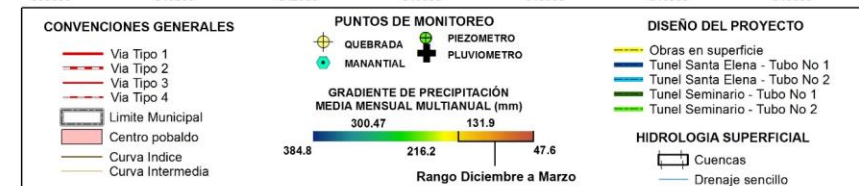
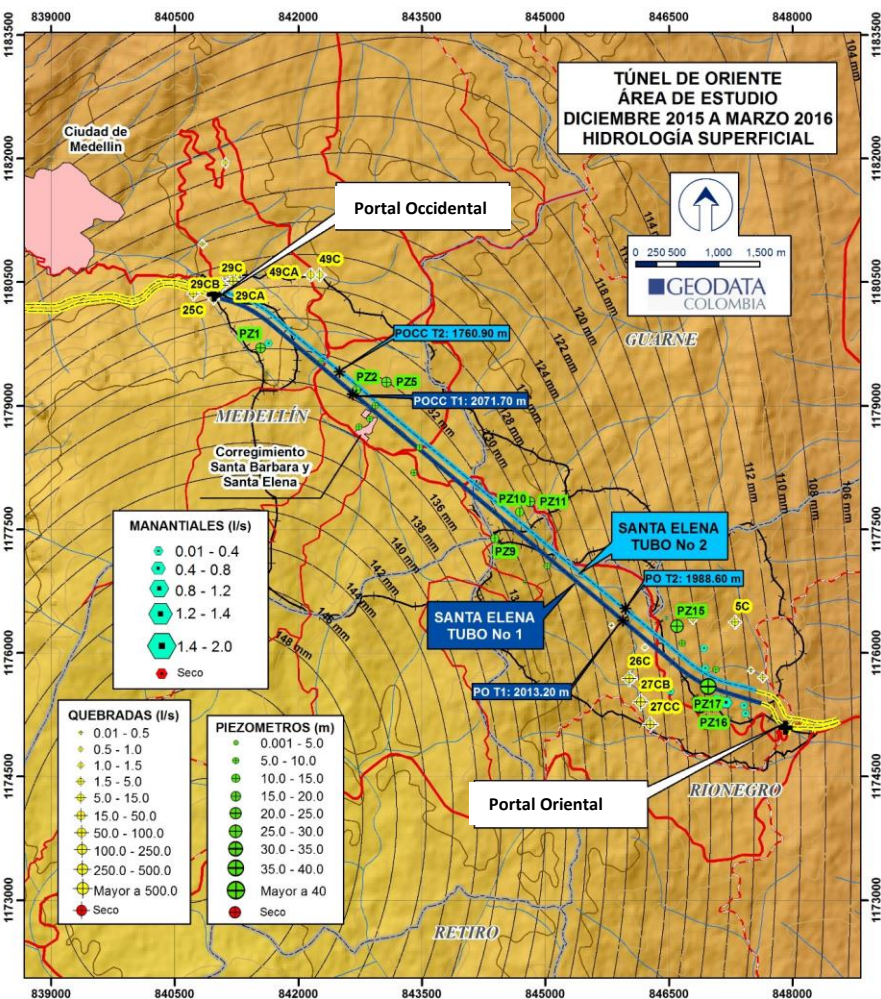


SEGUNDO PERIODO HÚMEDO 2014



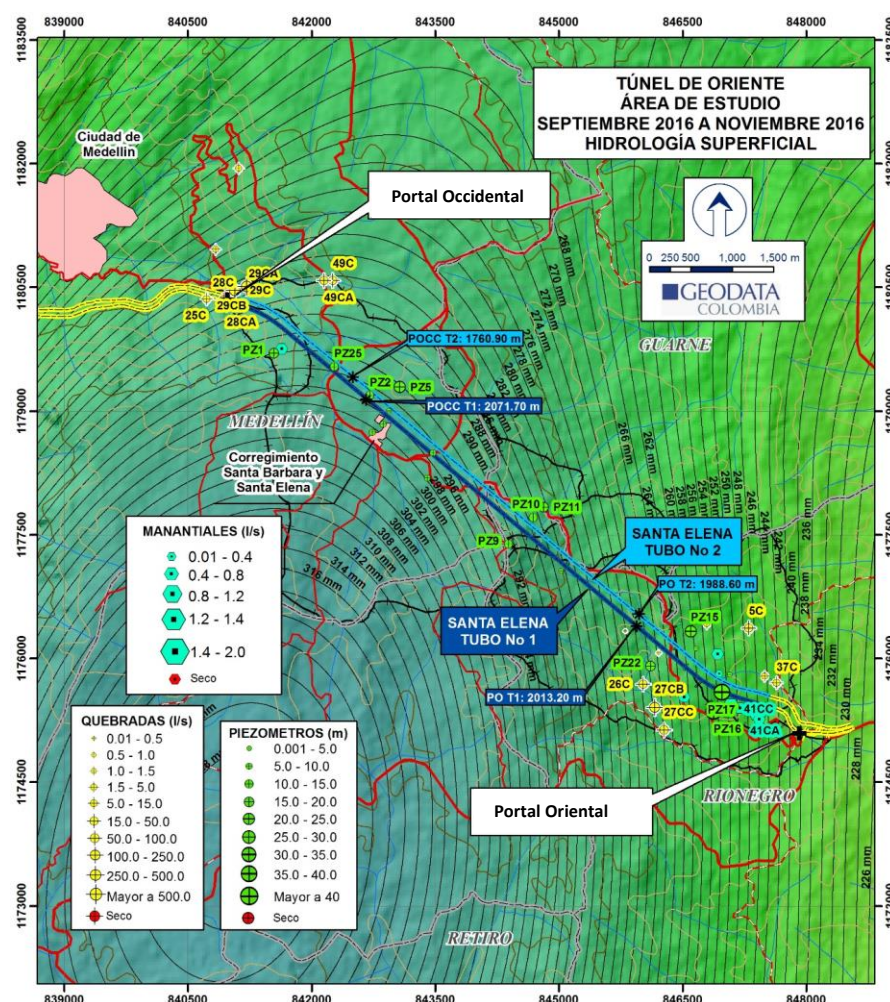
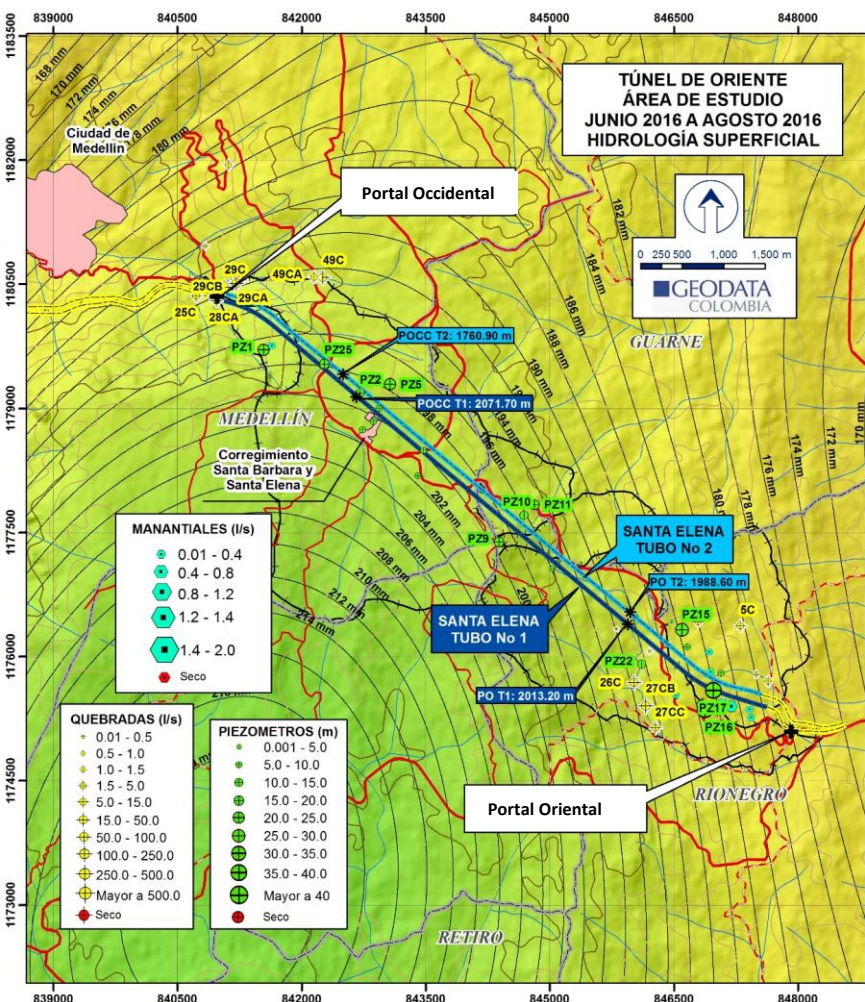
PRIMER PERIODO SECO 2015 - 2016

PRIMER PERIODO HÚMEDO 2016

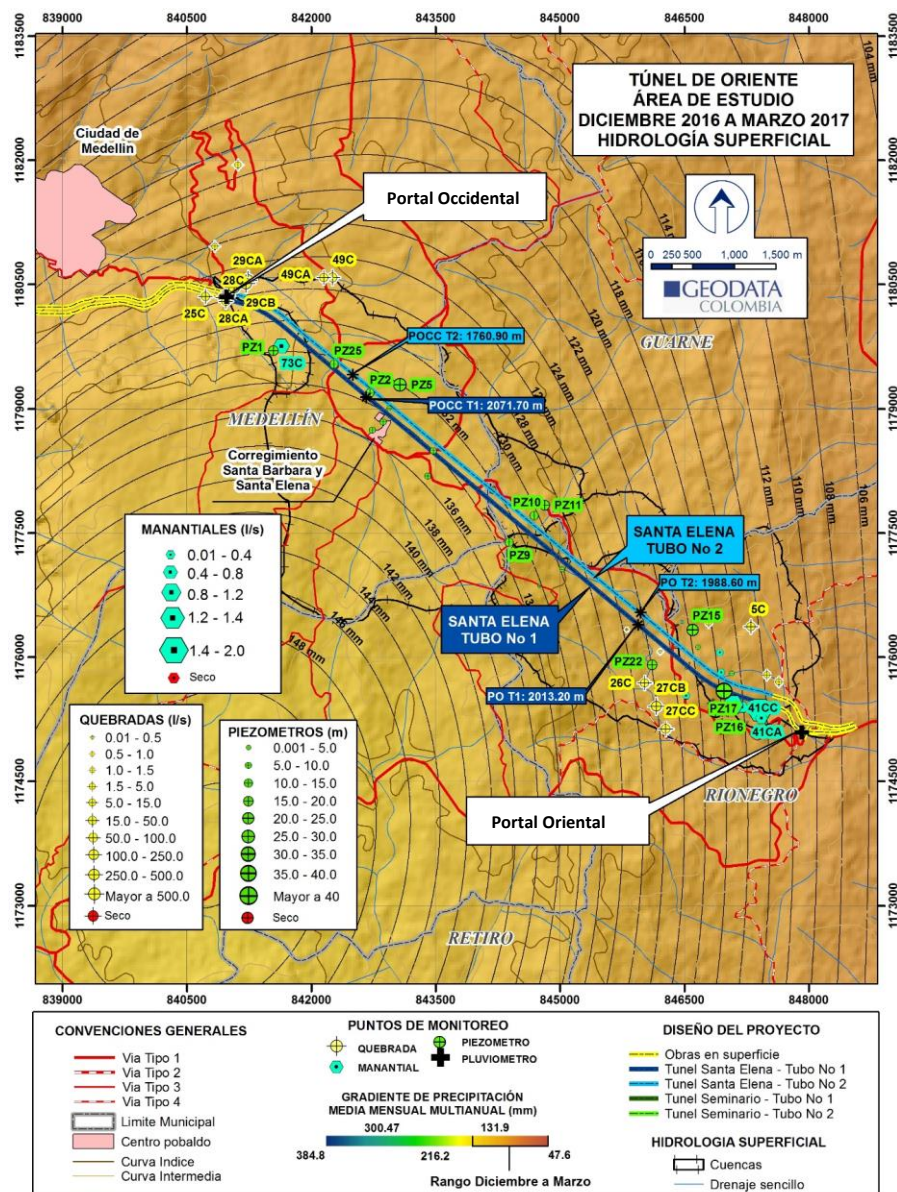


SEGUNDO PERIODO SECO 2016

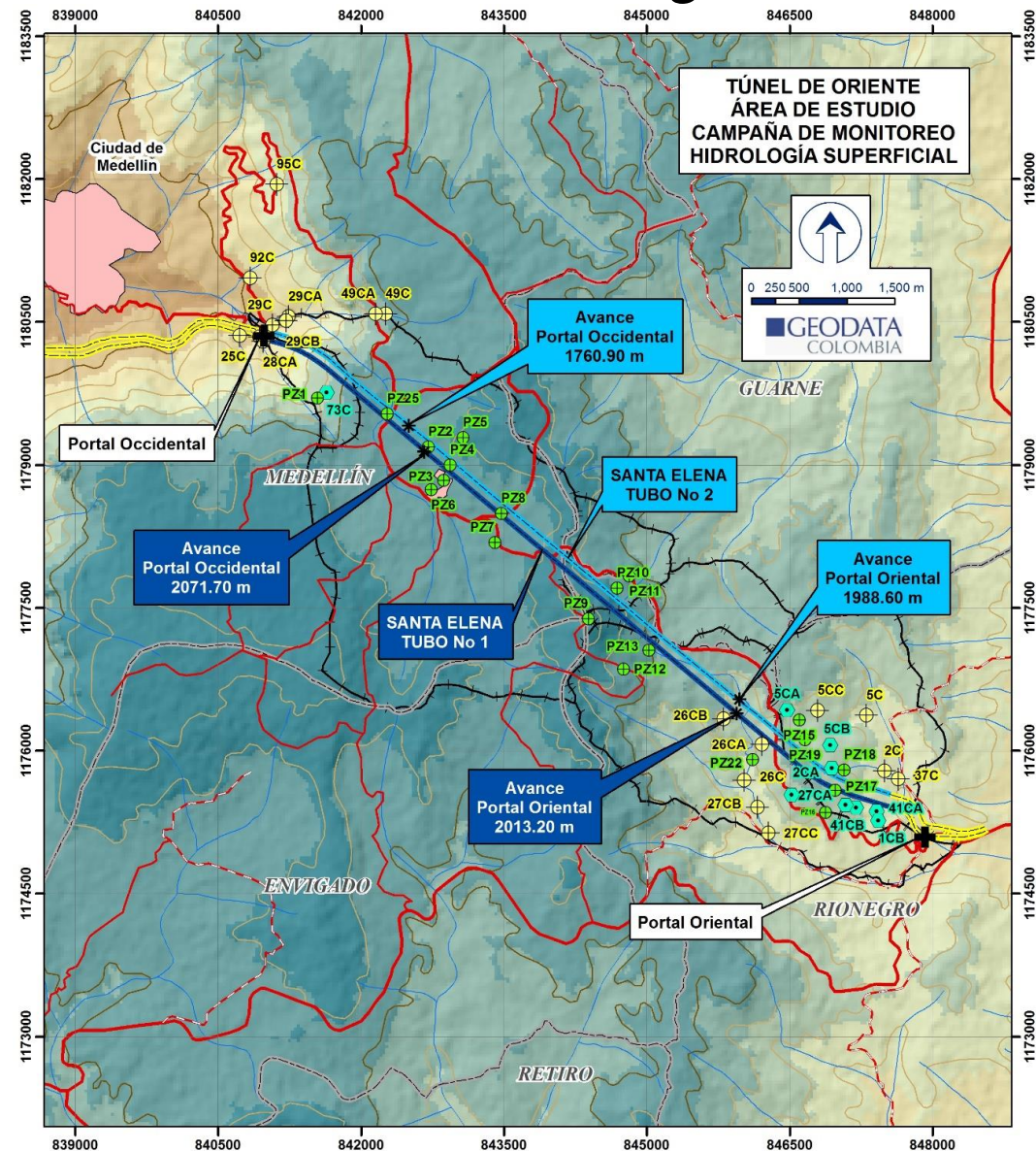
SEGUNDO PERIODO HÚMEDO 2016



PRIMER PERIODO SECO 2016 - 2017



✓ Monitoreo Puntos de agua



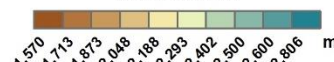
CONVENCIONES GENERALES

- Via Tipo 1
- Via Tipo 2
- Via Tipo 3
- Via Tipo 4
- Limite Municipal
- Centro poblado
- Curva Indice
- Curva Intermedia

PUNTOS DE MONITOREO

- ⊕ QUEBRADA
- MANANTIAL
- ⊕ PIEZOMETRO
- ⊕ PLUVIOMETRO

HIPSOMETRIA

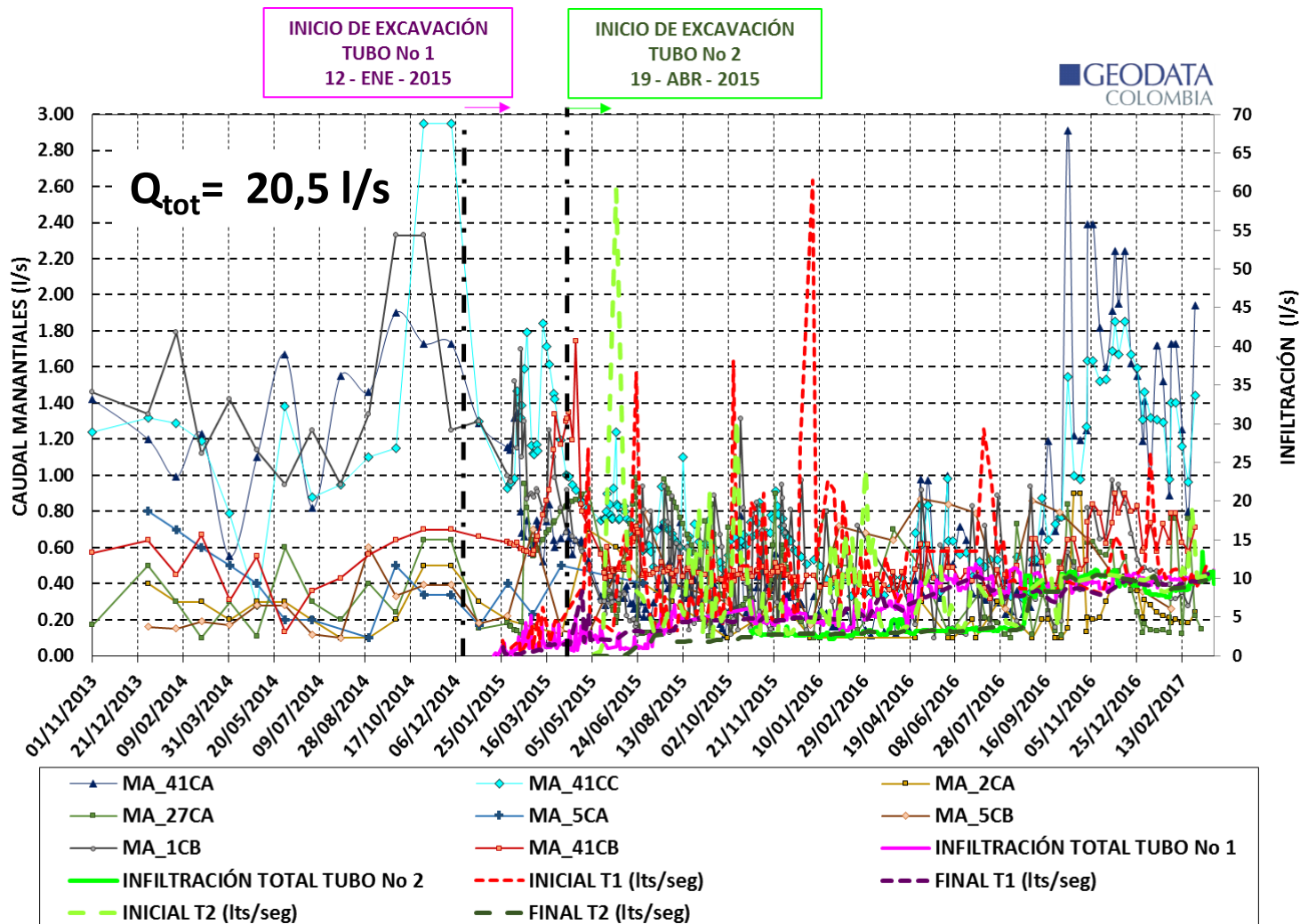


Nota: Datos de avance ilustrados hasta el 22/03/17

Monitoreo Caudales (l/s)

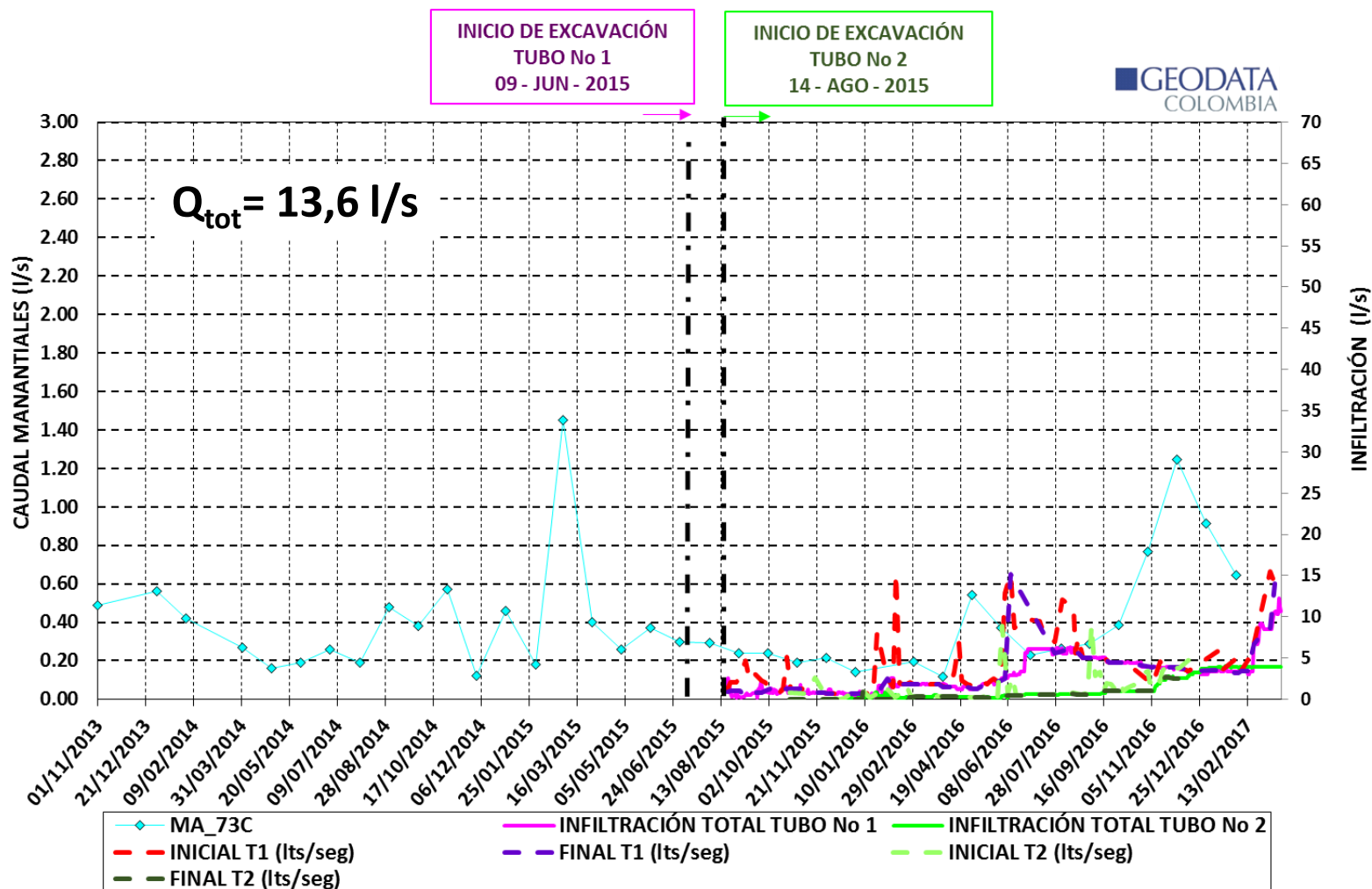
- Monitoreo Manantiales
- Monitoreo en puntos sobre cursos de agua superficial (Qdas)
- Monitoreo de niveles en piezómetros
- Monitoreo de infiltración dentro del túnel.

Caudales de infiltración en el túnel vs Caudal Manantiales



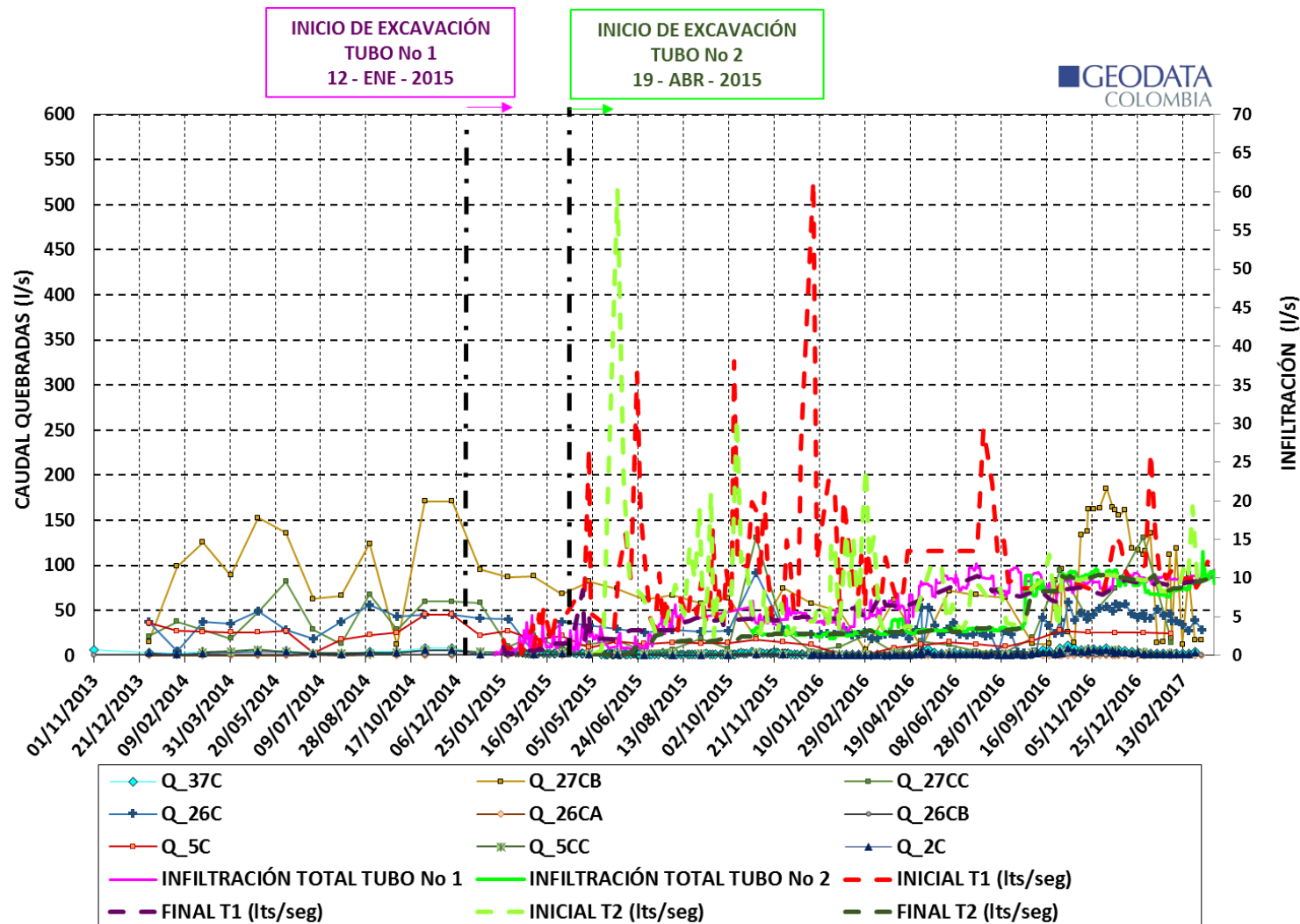
Portal Oriental

Caudales de infiltración en el túnel vs Caudal Manantiales



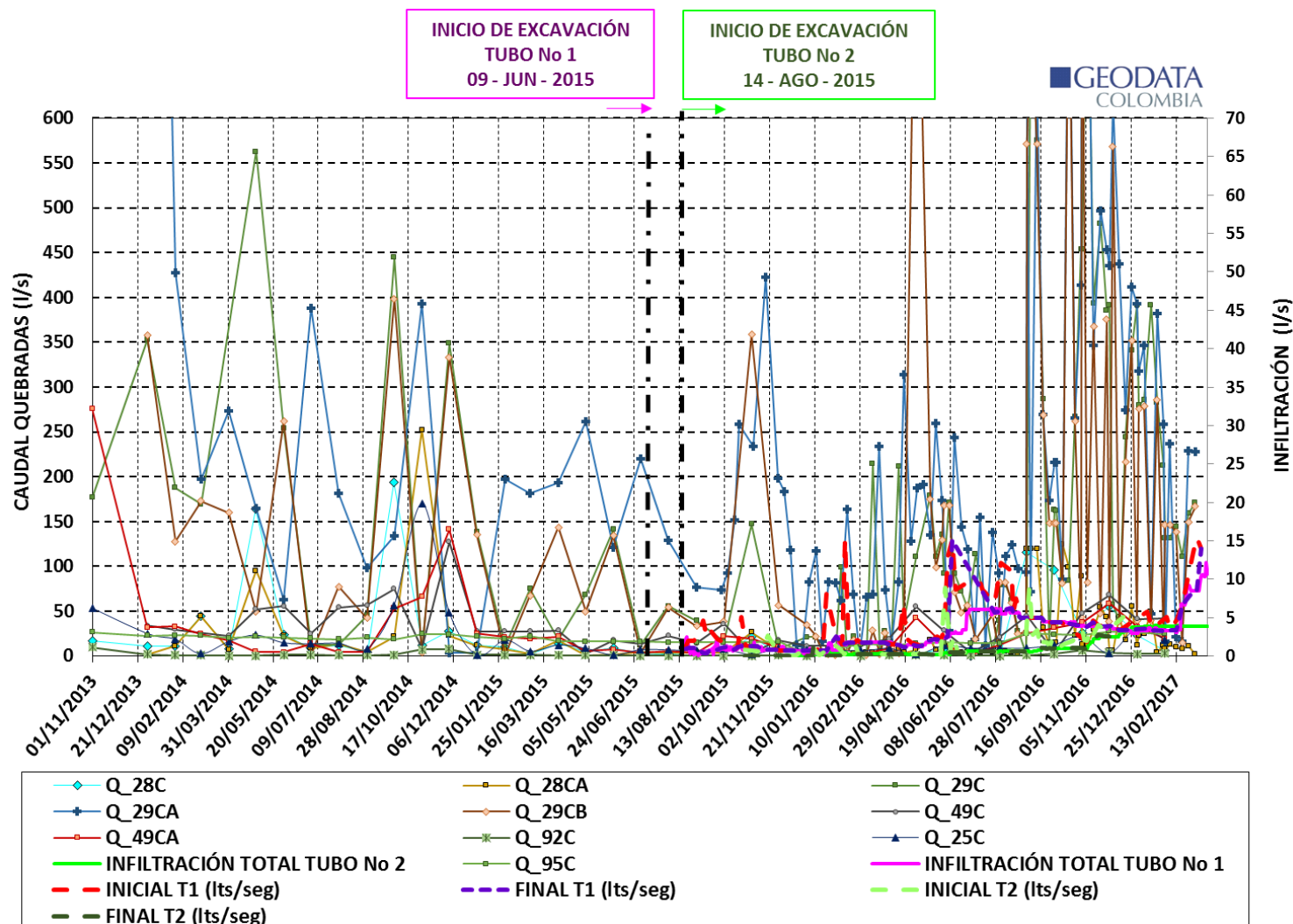
Portal Occidental

Caudales de infiltración en el túnel vs Caudal Quebradas



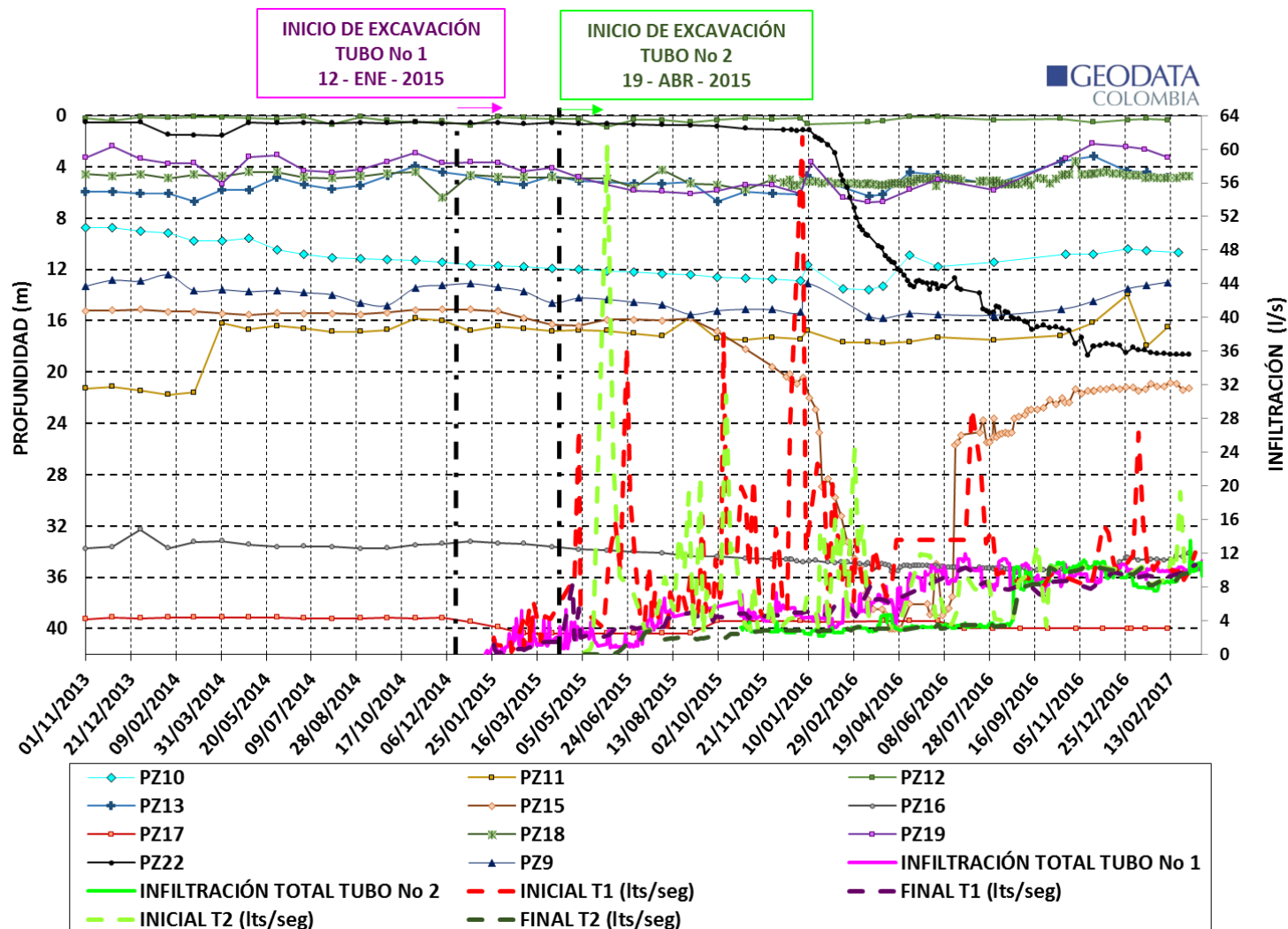
Portal Oriental

Caudales de infiltración en el túnel vs Caudal Quebradas



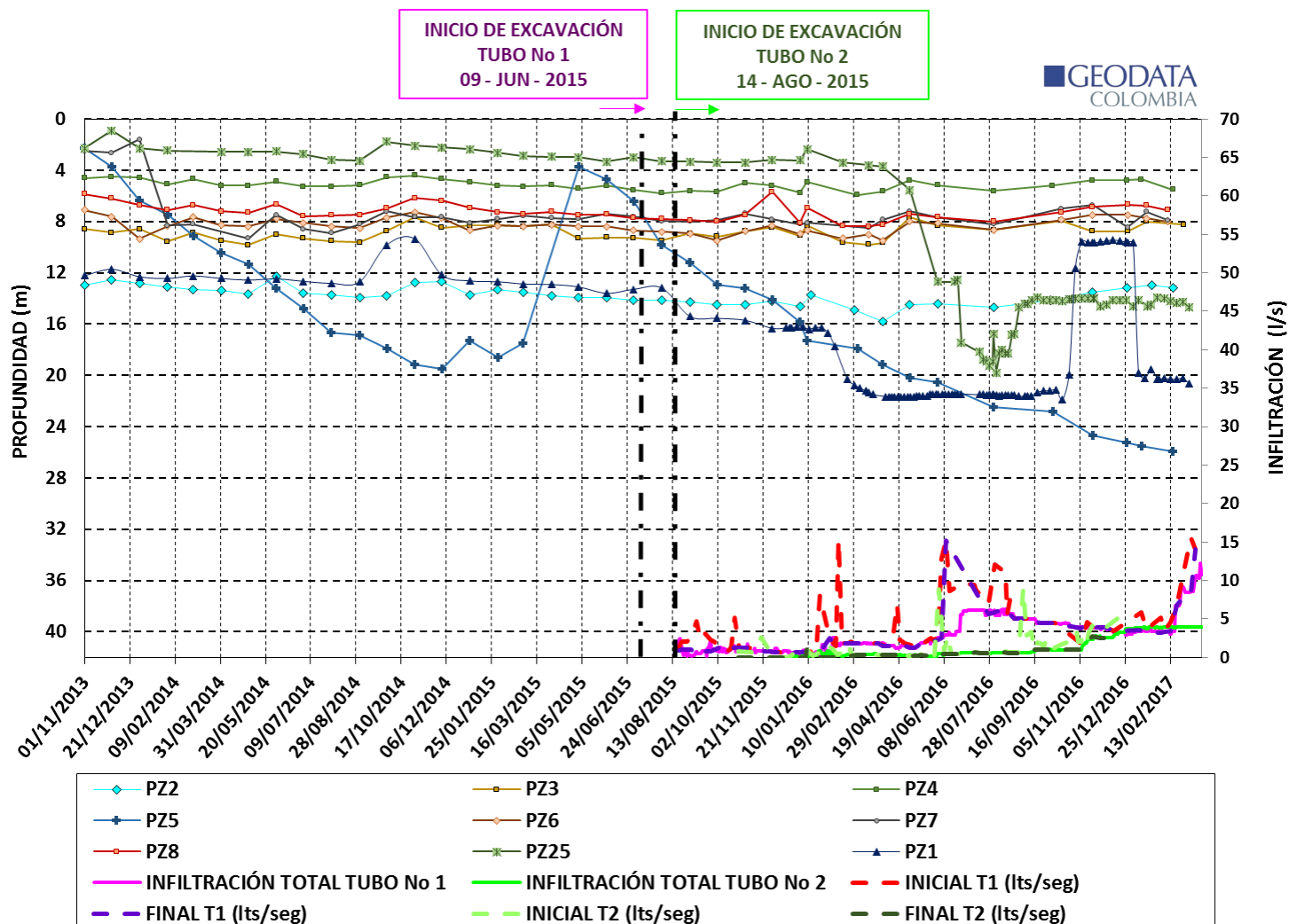
Portal Occidental

Caudales de infiltración en el túnel vs Piezómetros



Portal Oriental

Caudales de infiltración en el túnel vs Piezómetros



Portal Occidental

CONCLUSIONES

- ✓ Este estudio es pionero en Colombia en lo que respecta a la valoración de los impactos que puede llegar a generar la excavación de un túnel sobre los recursos hídricos subterráneos y superficiales.
- ✓ El modelo hidrogeológico de referencia permitió definir la cantidad y calidad de recursos hídricos presentes (manantiales, pozos, cursos de aguas superficiales), la previsión de ingreso de agua en el túnel (corto plazo y largo plazo), así como los potenciales impactos de la excavación del túnel sobre los recursos hídricos presentes en superficie.
- ✓ El análisis de riesgos y la valoración de los impactos permitió diseñar medidas de compensación en caso que estos sucedan, así como medidas de mitigación tendientes a evitarlos. Estas últimas consistieron en el uso de pre-inyecciones de impermeabilización dentro del ciclo constructivo del túnel.

CONCLUSIONES

- ✓ El avance de excavación del túnel al 20/03/2017 alcanzó el 48%,equivalente a una total de 7,9 km para los dos tubos.

Caudal total previsto Con Pre-inyecciones	Caudal medido al 20/03/2017, Con avance de excavación del 48%
63-72 l/s	35 l/s

- ✓ El seguimiento durante la construcción (infiltraciones en el túnel, caudales en manantiales/cursos de aguas superficiales y niveles en piezómetros) evidencian que el Túnel Santa Elena es un ejemplo positivo de como un apropiado estudio y diseño antes de la construcción, hacen posible la coexistencia de grandes obras de ingeniería con el respeto al medio ambiente, en particular la preservación del recurso hídrico (AGUA).
- ✓ Las herramientas más útiles fueron las investigaciones geológicas e hidrogeológicas iniciales, el inventario y seguimientos de puntos de agua, así como el modelo hidrogeológico conceptual. El análisis numérico bidimensional fue útil para verificar las hipótesis de trabajo analítico.

Ingeniero...¿Ese túnel va a
secar mi manantial?



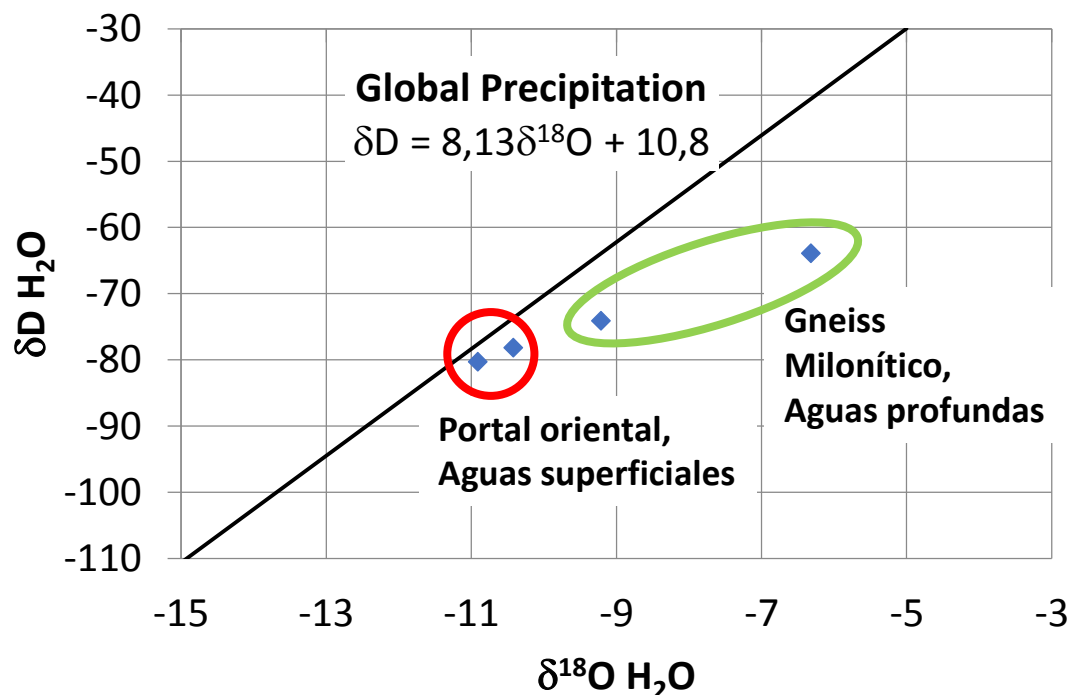
...?



GRACIAS

Algunas aproximaciones al monitoreo isotópico

- ✓ En el Portal Oriental, Anfibolitas y Grano-Dioritas
 - Agua superficial, Tipo Bicarbonato-Cálcica,
 - Conductividad eléctrica 50-200 $\mu\text{S/cm}$
- ✓ En el portal Oeste, Gneiss Milonítico en contacto fallado con Anfibolitas
 - Aguas profundas, Tipo Cloruro sódicas,
 - Conductividad eléctrica 12,8-43,3 mS/cm
 - Cl superior a 14953 mg/l ; Na superior a 8452 mg/l
 - Exceso de Deuterio



Aguas de origen hidrotermal?

Dunitas de Medellín (Peridotita rica en olivino) con formación de Pseudo-karst, flujos profundas – regionales a través de zonas de falla en dirección NNE-SSW?

