



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
**CIENCIAS**  
UDELAR [fciencias.edu.uy](http://fciencias.edu.uy)

# **Caracterización hidrogeoquímica e hidrodinámica y estimación de la recarga de los acuíferos Salto y Arapey**

**AUTOR: WILSON ESTEBAN ABELENDA FALCÓN**

**TUTORA: DRA. MARÍA PAULA COLLAZO**

**CO-TUTOR: LIC. ROBERTO CARRIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**LICENCIATURA EN GEOLOGÍA**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

**OCTUBRE 2016**

# Objetivos

## Objetivo General

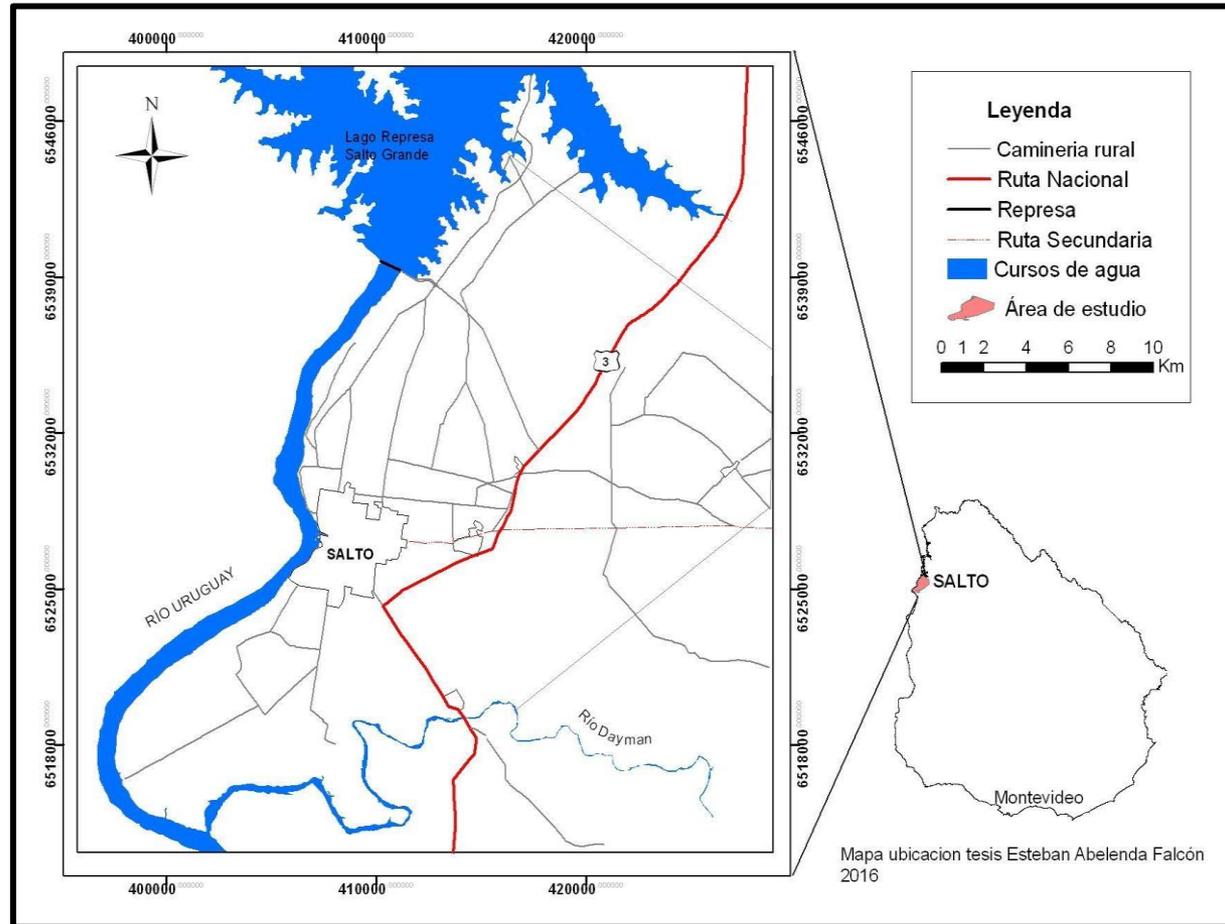
Caracterización hidráulica y química del agua subterránea de los acuíferos Salto y Arapey.

## Objetivo Específico

- Estimar la recarga de los acuíferos Salto y Arapey.
- Analizar posibles variaciones de los niveles de agua subterránea entre los años 1997 y 2015.
- Determinar si existe una variación de los componentes fisicoquímicos ambos acuíferos.
- Determinar la aptitud química para riego.

# Área de estudio

El área de estudio comprende aproximadamente 500 Km<sup>2</sup>, siendo su límites sur el río Daymán, el norte el embalse de Salto Grande y Brazo del Itapebí Grande, como límite occidental se encuentra el río Uruguay, mientras que al oriente se localiza el Meridiano 430000 del sistema de coordenadas UTM, 21H, elipsoide WGS84.



# Metodología

## Trabajo de gabinete I

- Recopilación y análisis de antecedentes e información bibliográfica.
- Recopilación y tratamiento de datos de perforaciones de organismos públicos y empresas privadas generando un inventario de pozos.
- Análisis de antecedentes geológicos.
- Ampliación de la red de monitoreo realizada por DINAMIGE (1997 – 2015), seleccionando nuevos puntos de muestreo.
- Selección de puntos de muestreo para agua subterránea.

## Trabajo de Campo

- Reconocimiento de unidades geológicas (litologías, geometría de las unidades, aspectos estructurales) e hidrogeológicas de la zona de estudio.
- Muestreos y análisis del agua subterránea en los puntos de control ya planificados con anterioridad en la etapa de Gabinete I.
- Medición de profundidad del nivel estático, profundidad total, determinación de parámetros fisicoquímicos *in situ* (pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos totales) y toma de muestras para análisis químico.





## Trabajo de gabinete II

- Procesamiento y análisis de la información obtenida en campo como suministrada por el laboratorio.
- Cálculo de la recarga de ambos acuíferos.
- Representación gráfica (diagramas de Piper, Schoeller-Berkaloff)
- Balances iónicos y cálculos de errores correspondientes
- Determinación de la aptitud del agua subterránea para riego por el método “Riesgo de absorción de sodio” (RAS).
- Determinación de la evolución hidrodinámica de los acuíferos comparando los resultados con estudios anteriores.
- Modelado de mapas piezómetros, de conductividad y de diferencias de niveles estáticos en el tiempo utilizando el modelo matemático de interpolación inversa a la distancia.

Software utilizado: ArcGis versión 10.1, Microsoft Office, Corel draw, NETPATH-WIN, entre otros.

# Hidrogeología

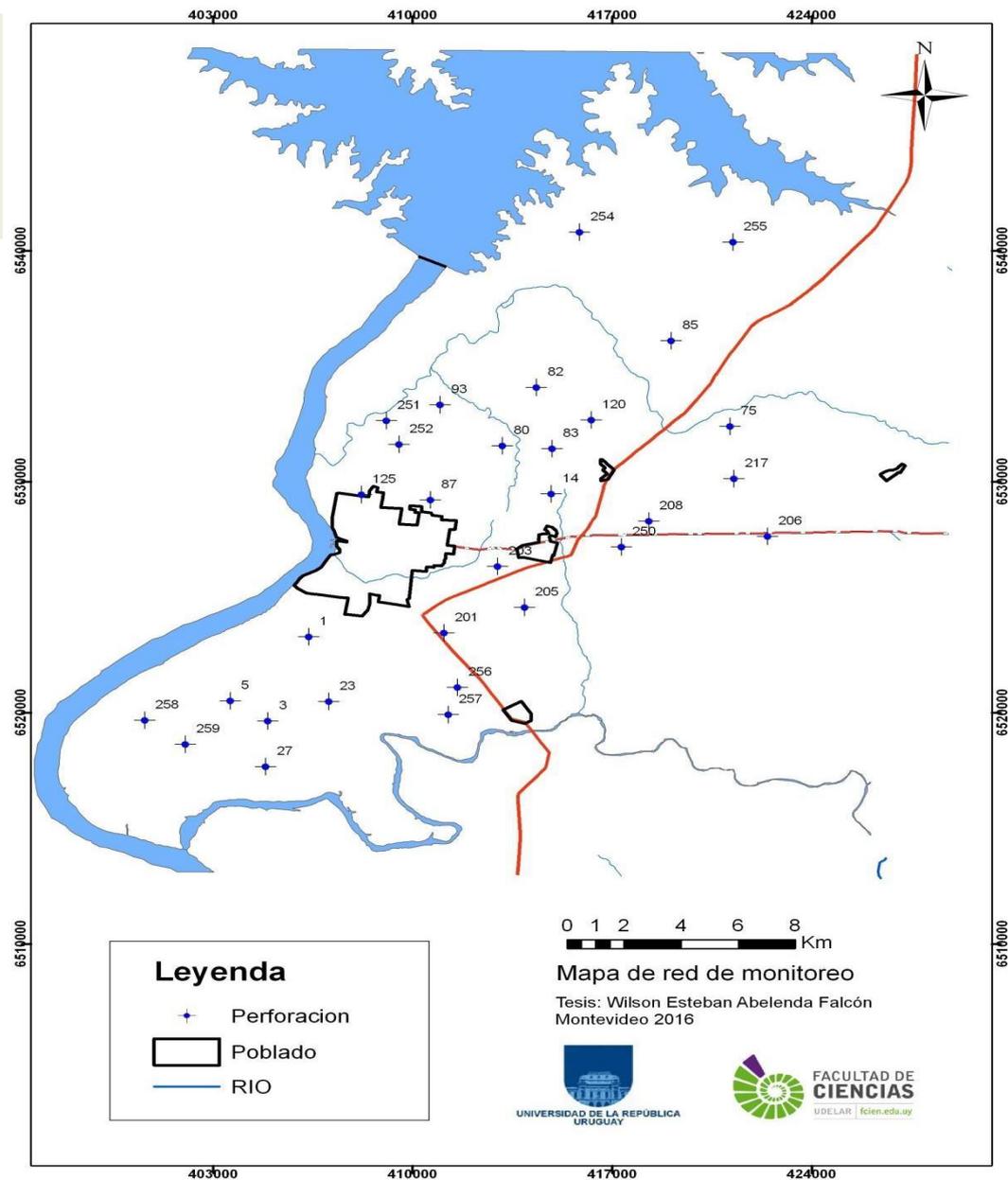
- En la zona de estudio se diferencian dos unidades hidrogeológicas principales:
  - el Acuífero Salto de porosidad primaria compuesto por areniscas y conglomerados de origen fluvial.
  - el Acuífero Arapey fisurado de porosidad secundaria constituido por basaltos tholeíuticos.

# Resultados

- Geología
- Rasgos hidrogeológicos del acuífero Salto.
- Rasgos hidrogeológicos del acuífero Arapey
- Balance hídrico
- Diferencias de niveles estáticos (1997-2015)
- Piezometría (1997-2015)
- Hidrogeoquímica
- Elementos Traza

# Resultados

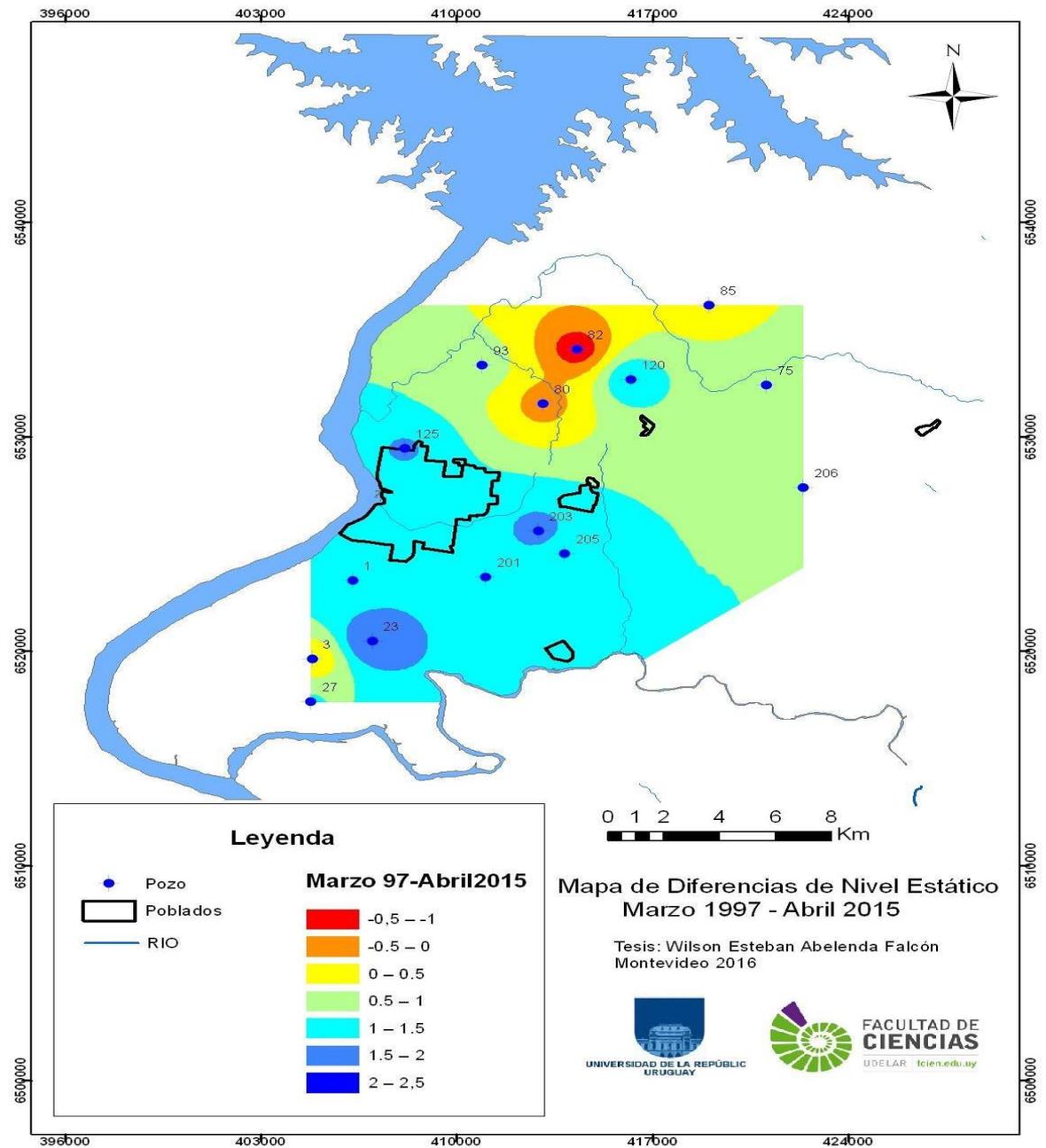
## Mapa ubicación de perforaciones





# Resultados

## Diferencias de niveles estáticos (1997-2015)

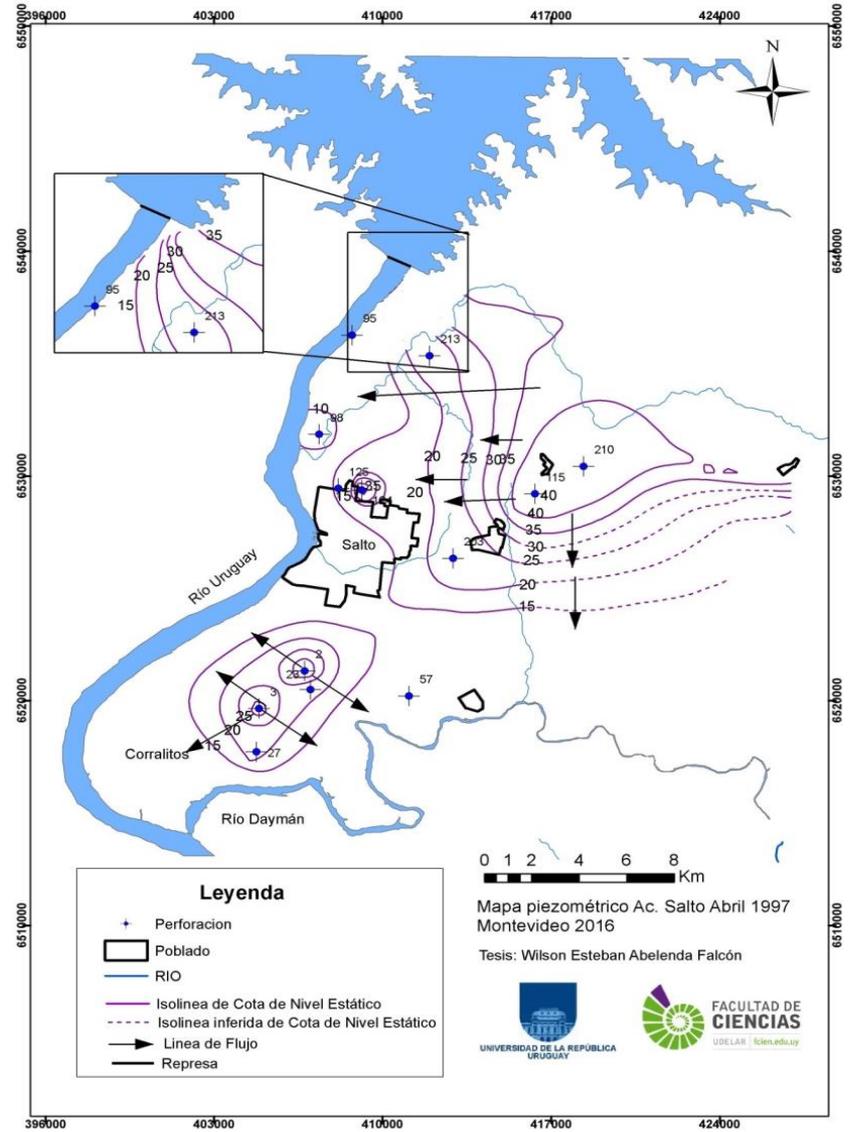
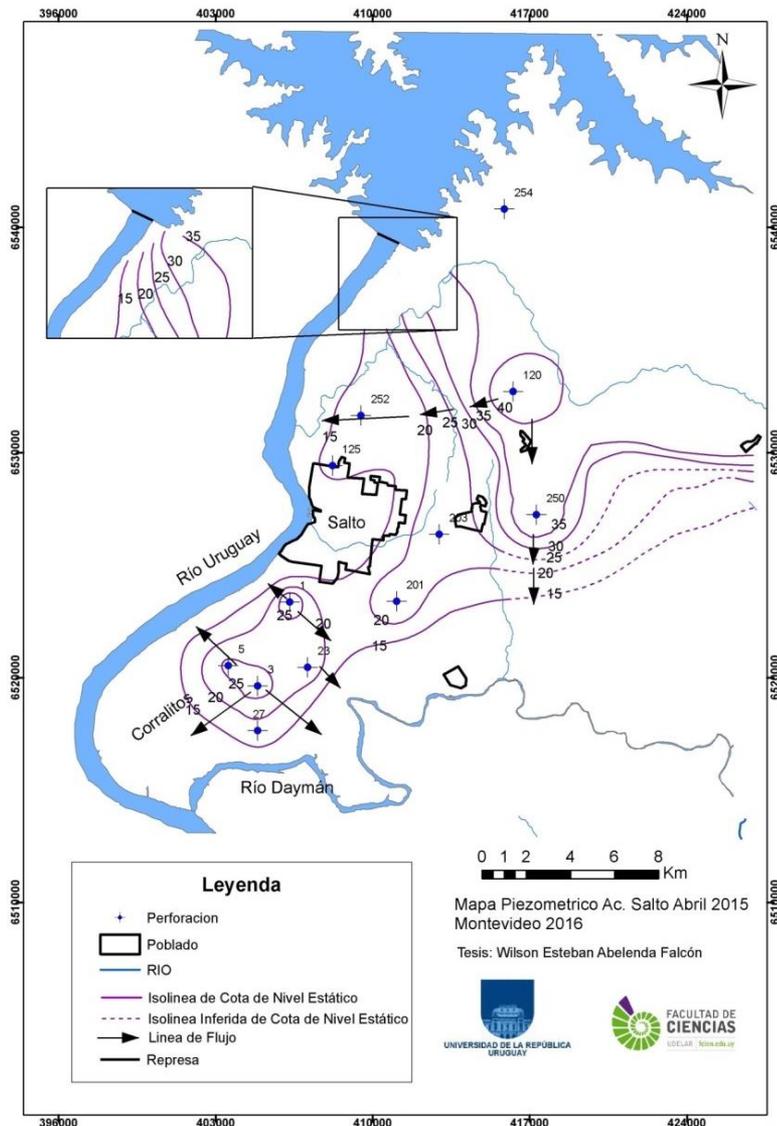


# Resultados

## Piezometría - Acuífero Salto

Abril 2015

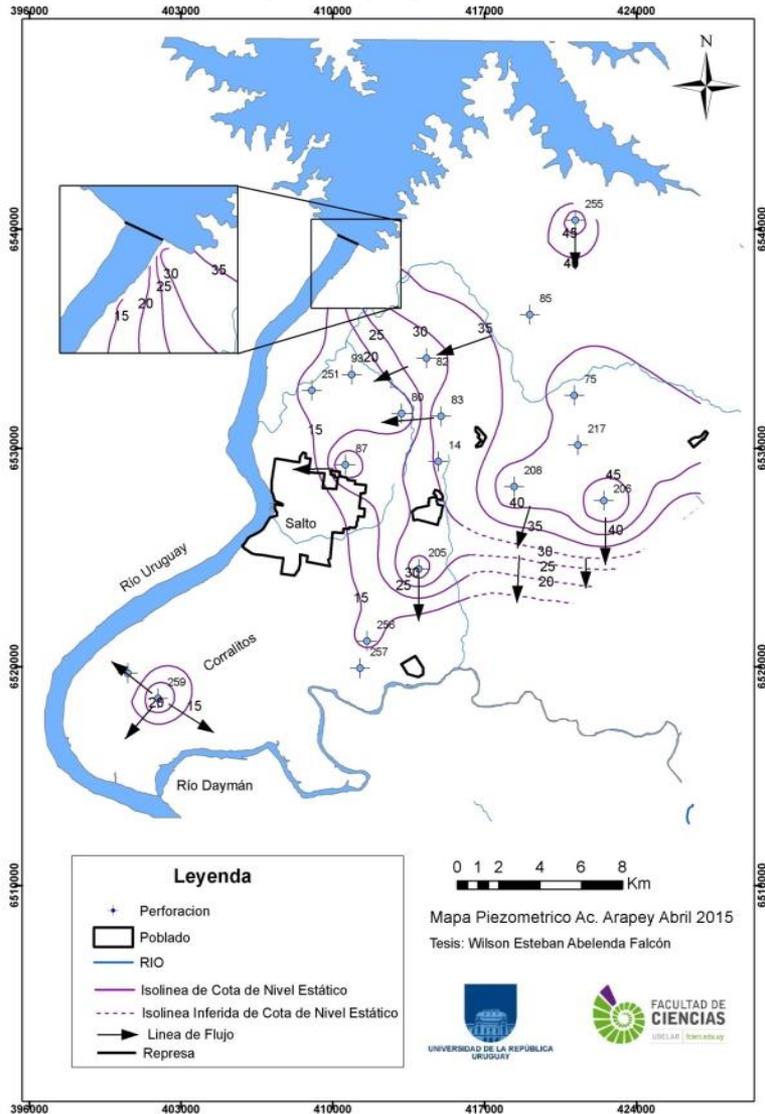
Abril 1997



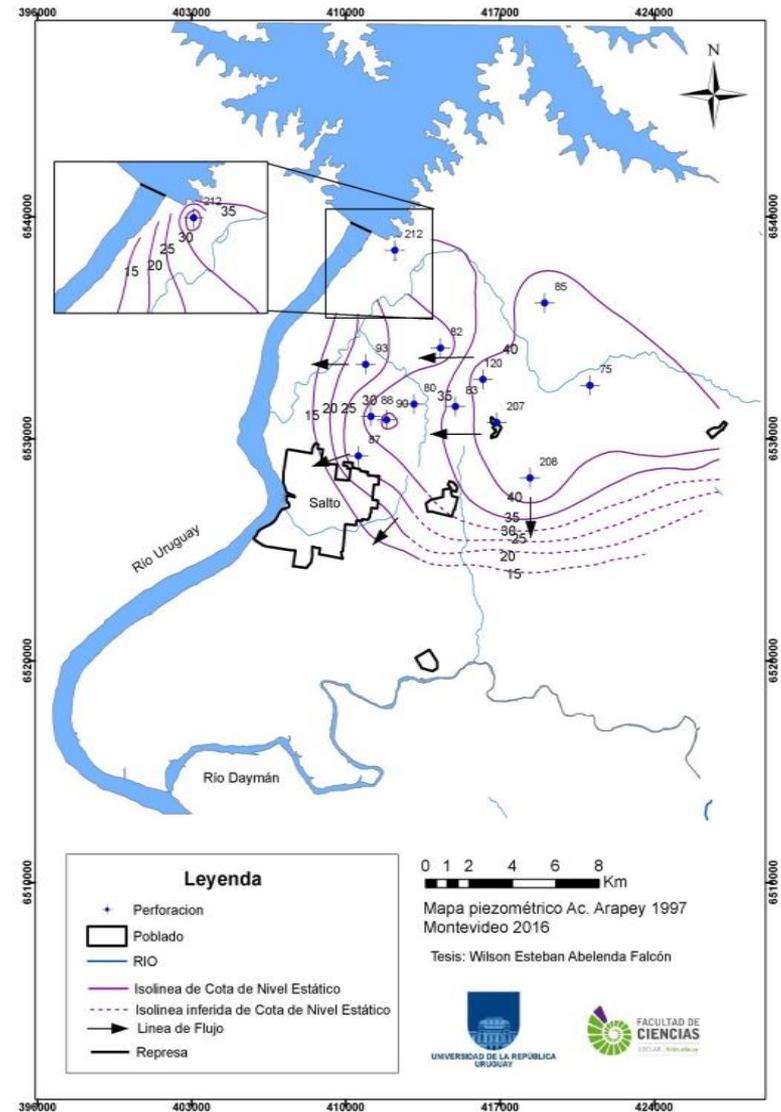
# Resultados

## Piezometría - Acuífero Arapey

Abril 2015



Abril 1997



## Resultados Hidrogeoquímica - Acuífero Salto

# Características Físico-Químicas

Temperatura: media 20,5°C, máximas de 21,2°C y mínimas de 20°C

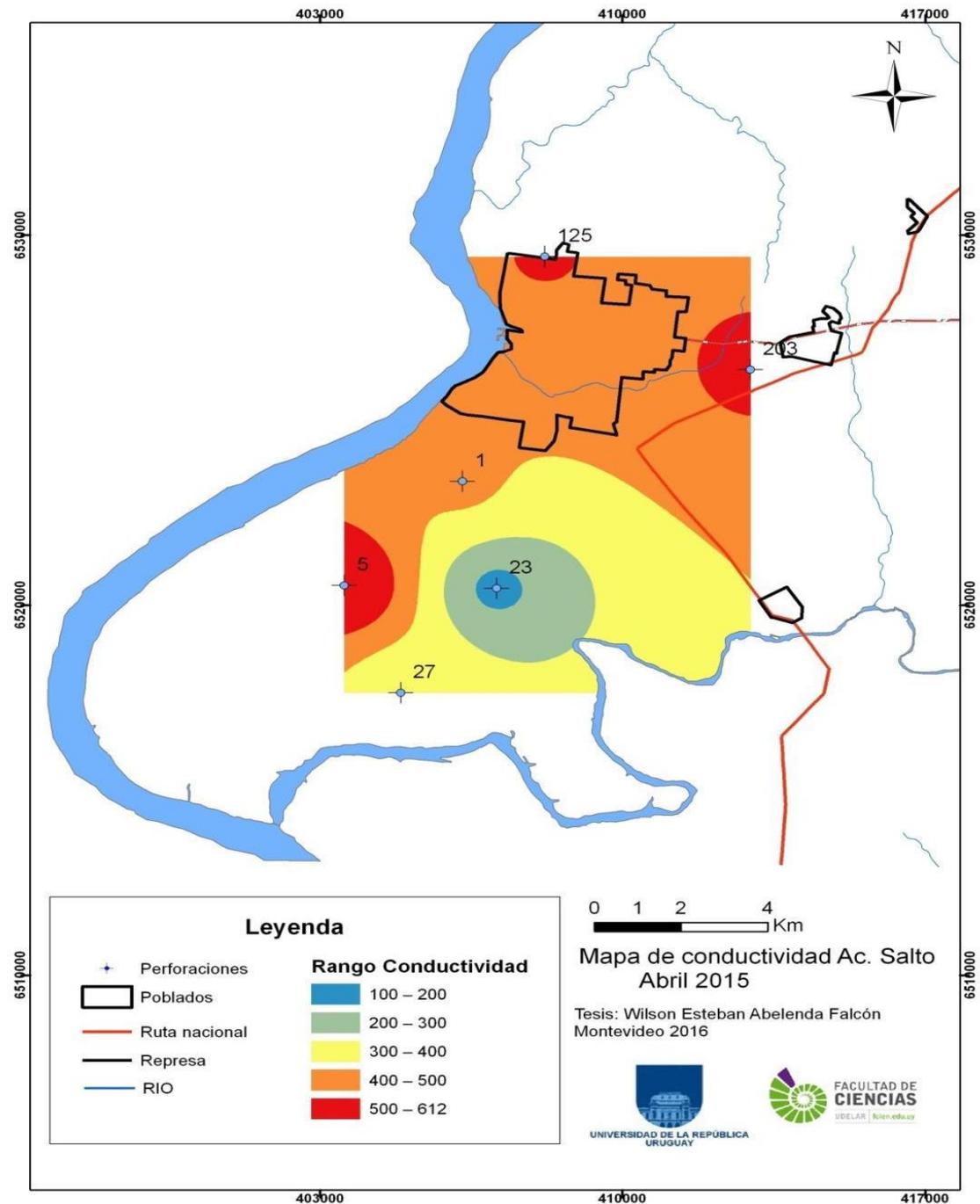
Potencial de hidrogeniones campo: (pH) mínimo 6,4. máximo 7,6

Pozo	203	125	1	23	5	27	254
CE uS/cm	512	503	413	178	612	344,00	
pH	7,40	7,30	6,80	7,10	7,60	7,60	6,40
aniones(%)	%	%	%	%	%	%	%
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	80,46	81,45	54,44	87,87	42,69	77,08	76,77
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	2,39	4,28	7,32	5,44	46,36	5,03	4,24
Cl <sup>-</sup>	5,95	7,00	8,54	2,22	4,53	2,80	5,39
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11,20	7,27	29,69	4,47	6,43	15,09	13,60
Cl <sup>-</sup> +NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	17,15	14,27	38,24	6,69	10,96	17,89	18,99
sum aniones	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
cations(%)	%	%	%	%	%	%	%
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	14,31	15,36	16,84	35,04	29,33	14,66	14,76
Na <sup>+</sup>	13,39	14,87	15,76	27,01	29,00	11,60	13,47
K <sup>+</sup>	0,92	0,49	1,08	8,03	0,32	3,06	1,28
Ca <sup>++</sup>	66,08	73,99	61,18	46,34	55,38	63,97	56,52
Mg <sup>++</sup>	19,61	10,65	21,98	18,62	15,29	21,37	28,72
sum cationes	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Error (%)	1,68	-1,85	1,12	3,35	2,70	-4,50	-1,39

# Resultados Hidrogeoquímica Acuífero Salto

Conductividad Eléctrica en campo:  
valor medio 427  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mínimo 178  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,  
máximo 612  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Dureza Total: valor medio 240  $\text{mg}/\text{l}$  ;  
( $\text{HCO}_3^-$ ) el valor medio es de 216 ppm. Según el  
valor medio de dureza total **se la clasifica  
como agua dura.**



Resultados Hidrogeoquímica – Acuífero Salto

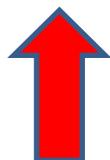
## Iones principales

Ion	[ ] Media mg/l	[ ] Mínima mg/l	Ubicación	[ ] Máxima mg/l	Ubicación
Sodio	22,4	7,4	Represa	53	Corralitos
<b>Potasio</b>	3,8	1,0	Corralitos	<b>14,9</b>	Corralitos
Calcio	62,7	27	Norte Salto	93	Norte Salto
Magnesio	11,2	8,1	Norte Salto	15,8	Este Salto
Bicarbonato	216,6	115	Norte Salto	316	Este Salto
<b>Sulfato</b>	32,7	5,0	Represa	<b>167,5</b>	Corralitos
Cloruros	9,5	3,5	Corralitos	16,2	Norte Salto
<b>Nitratos</b>	36	12,3	Norte Salto	<b>76,5</b>	Sur Salto

# Resultados

## Hidrogeoquímica – Acuífero Arapey

Pozo	208	206	217	85	83	82	80	93	255	256	257	258	120	251
CE uS/cm	500	630	560	460	454	440,00	418,00	405,00	546,00	565,00	615,00	570,00	716,00	407,00
pH	7,00	7,00	7,10	6,80	7,40	7,40	7,40	7,40	7,20	7,30	7,60	6,90	6,70	7,40
aniones	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HCO3-	331,0	356,0	335,0	304,0	283,0	276,00	307,00	287,00	383,00	336,00	318,00	355,00	355,00	290,00
SO4=	7,6	20,6	9,7	7,4	6,9	8,30	6,40	6,00	5,00	8,70	22,40	10,50	17,20	3,50
Cl-	8,1	19,2	8,6	6,1	5,0	8,10	4,50	4,00	2,50	6,70	29,80	4,50	17,90	3,00
NO3-	29,1	47,6	35,6	24,9	33,5	40,80	12,30	17,30	5,40	52,80	25,30	44,20	124,00	20,80
sum aniones	375,8	443,4	388,9	342,4	328,4	333,2	330,2	314,3	395,9	404,2	395,5	414,2	514,1	317,3
cationes	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Na+	31,5	26,5	23,5	22,2	40,6	22,50	22,50	25,50	16,80	61,00	24,60	15,30	25,50	6,70
K+	1,9	1,8	1,5	1,1	1,1	1,10	1,60	1,10	1,40	2,50	1,20	2,70	2,30	2,10
Ca++	77,0	102,0	86,0	77,0	142,0	76,00	74,00	63,60	80,00	51,00	88,00	93,00	127,00	78,00
Mg++	13,2	18,9	22,0	12,5	3,6	7,50	6,60	11,00	18,90	11,60	13,30	14,20	14,50	4,00
sum cationes	123,6	149,2	133	112,8	187,3	107,1	104,7	101,2	117,1	126,1	127,1	125,2	169,3	90,8
Error (%)	0,61	1,86	4,88	1,43	25,43	-1,43	-2,11	0,04	-1,65	-3,90	-2,42	-2,38	0,19	-6,84





Resultados Hidrogeoquímica - Acuífero Arapey

## iones principales

Ion	[ ] Media mg/l	[ ] Mínima mg/l	Ubicación	[ ] Máxima mg/l	Ubicación
Sodio	25	6,7	Norte Salto	61	Daymán
Potasio	1,7	1,1	Norte Salto	2,7	Corralitos
Calcio	82,5	51	Daymán	142	Noreste Salto
Magnesio	13	3,6	Norte Salto	22	Colonia 18 de Julio
Bicarbonato	325,6	276	Norte Salto	383	Este represa
Sulfato	10,3	5,0	Este represa	22,4	Daymán
Cloruros	9,5	2,5	Este represa	29,8	Daymán
<b>Nitratos</b>	37	5,4	Este represa	<b>124</b>	Noreste Salto



## Resultados

# Elementos Traza

Identificación de la muestra	V (mg/L)	Cr (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cu (mg/L)	Zn (mg/L)	As (mg/L)	Se (mg/L)	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)
27	0,0453	< 0,001	< LD	0,0014	< LD	0,0466	0,0096	< 0,001	< LD	< LD
83	0,0234	< 0,001	< LD	0,0017	< LD	< 0.01	0,0068	< 0,001	< LD	< LD
254	0,015	< LD	< LD	< 0,001	< LD	0,0253	< 0,001	< 0,001	< LD	< LD
255	0,0452	< 0,001	0,0228	0,0024	< 0,01	0,0442	0,0035	< 0,001	< LD	0,0097
256	0,0402	< 0,001	< LD	0,0015	< LD	0,035	0,0091	0,0012	< LD	< LD
257	0,198	< LD	< 0,002	0,0021	< LD	< 0.01	0,0057	0,0021	< LD	< LD
258	0,147	< 0,001	0,0069	0,0021	< LD	0,0281	0,0014	0,0013	< LD	< LD
259	0,0024	< 0,001	0,0534	0,0024	< LD	0,0299	0,0011	0,0012	< LD	0,0123
<b>LD (&lt; LD No detectado; menor al límite de detección)</b>	0,0003	0,0003	0,0006	0,0003	0,003	0,003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0006

# Conclusiones Salto

- ✓ Recarga anual de agua:  $2,03 \times 10^7 \text{ m}^3$  /año
- ✓ Zona de recarga: ubicada en el Norte del área de estudio, en las proximidades de la localidad Colonia 18 de Julio y al Sur (zona Corralitos).
- ✓ Zona de descarga: flujo subterráneo con direcciones al Oeste y, hacia el Sur en dirección al río Daymán .
- ✓ Líneas de flujo entre los años 1997 y 2015 y la simulación propuesta por Montañó (1995) no muestra diferencias en relación a la dirección de flujo, ni a las cotas de niveles estáticos en la zona de Corralitos
- ✓ La explotación intensiva del acuífero no provoca descenso de los niveles estáticos.
- ✓ Análisis Fisicoquímicos: valores que superan las normas en nitratos, sulfato y potasio (debido seguramente a la cercanía de una fosa séptica o el uso de fertilizantes y pesticidas)
- ✓ Aguas ricas en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$   $\text{HCO}_3^-$  y empobrecida en  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^-$ .
- ✓ **Según el diagrama de Piper el agua subterránea se puede clasificar como “Bicarbonatada cálcica”.**

# Conclusiones Arapey

- ✓ Recarga anual de agua:  $7,80 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$
- ✓ Recarga dada por infiltración de aguas superficiales y el efecto de la represa de Salto Grande. La cota de este embalse es de 35 msnm y por debajo de ella es de 11 msnm
- ✓ Zona de recarga: ubicada en el Norte del área de estudio, influenciada por la represa Salto Grande.
- ✓ Zona de descarga: flujo subterráneo con direcciones al Oeste y, hacia el Sur en dirección al río Daymán .
- ✓ No se encuentra diferencias sustanciales en las líneas de flujo entre el periodo 1997-2015
- ✓ Análisis Fisicoquímicos: valor que supera las normas en nitratos (debido seguramente a la cercanía de una fosa séptica o el uso de fertilizantes y pesticidas)
- ✓ Aguas ricas en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y algunas en  $\text{Na}^+$  y empobrecida en  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^-$
- ✓ **Según el diagrama de Piper el agua subterránea se puede clasificar como “Bicarbonatada cálcica”.**

# Conclusiones

- ✓ Analizando el contenido del  $\text{HCO}_3^-$  se observa que las perforaciones que captan agua del acuífero Salto tienen un menor concentración que aquellas del Arapey.
- ✓ RAS se clasifican como C2-S1 y la perforación 23 como C1-S1. Comparando los resultados con aquellos de Montaña (1995) no se encuentra una variación en el riesgo de absorción de sodio.
  - C2= Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
  - S1= Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
- ✓ Según los resultados de los análisis ICP-MS, no se encontraron valores que superen la norma de la UNIT 833:2008 ni de la OMS.
- ✓ En este trabajo no se pudo concluir si existe una relación hidráulica e hidrogeoquímica entre ambos acuíferos.

# Recomendaciones

A- A pesar de que no se constató descenso en los niveles piezométrico resulta necesario la continuación del monitoreo de los acuíferos Salto y Arapey, y un incremento de sitios en la red de monitoreo.

B- Se recomienda realizar pozos de monitoreo en cada acuífero y que estos se encuentren equipados de manera permanente a fin de obtener datos de niveles estáticos de forma continua y en el tiempo real.

C- Es imprescindible que en los futuros monitoreos se incluya la calidad del agua subterránea, para ambos acuíferos con el fin de obtener concentraciones de iones mayores y trazas (principalmente arsenico) además de incluir en el análisis estudios de isotopos.

# Gracias !

