

# Trabajo Fin de Máster

## *ANÁLISIS Y DESARROLLO DE MAPAS PARA EVALUAR LA CORRELACIÓN ENTRE EL RÍO SAVA Y EL ACUÍFERO DE ZAGREB MEDIANTE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS*

**Intensificación:**

*ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

**Autor:**

*MIGUEL SORIANO JUAN*

**Director:**

*DR. MANUEL AUGUSTO PULIDO VELÁZQUEZ*

**Codirector/es:**

*DR. ZORAN NAKIĆ*

*ZORAN KOVAĆ*

**SEPTIEMBRE, 2016**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis y desarrollo de mapas para evaluar la correlación entre el río Sava y el acuífero de Zagreb mediante herramientas estadísticas.

**Título del TFM en inglés:** Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi i desenvolupament de mapes per a avaluar la correlació entre el riu Sava i l'aquífer de Zagreb mitjançant eines estadístiques.

**Alumno:** MIGUEL SORIANO JUAN .

**Director:** DR. MANUEL AUGUSTO PULIDO VELÁZQUEZ

**Codirector/es:**

DR ZORAN NAKIĆ

**Director experimental:** ZORAN KOVAĆ

**Fecha de Lectura:** SEPTIEMBRE, 2016

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

Zagreb está situada al Norte de Croacia, tiene una población de 800.000 personas y está experimentando una explosión demográfica en los últimos años, la ciudad entera está construida sobre el acuífero de Zagreb y se abastece de este sistema. Es por ello que está aumentando la demanda de agua de este recurso y el acuífero está comenzando a ser no sostenible. A lo largo de los años diferentes organismos han hecho un esfuerzo para incrementar el conocimiento del sistema. Se trata de un acuífero de carácter aluvial con una geología, hidrología y delimitaciones bien estudiadas. Ciertos estudios anteriores revelan que existe una correlación entre el río y el acuífero, pero hasta la fecha no se conoce su dependencia y no se ha estudiado en profundidad. Para poder analizar el acuífero es necesario estudiar a fondo previamente sus características geológicas, geográficas, pedológicas, hidrológicas, climáticas, la cuenca del río Sava hasta Zagreb y sus gestión. De esta forma si hay correlación estadística entre ambas masas de agua, será más fácil establecer una correlación física también. La gestión de río Zagreb es uno de los principales problemas de la autodeterminación de la regulación de los caudales a su paso por Croacia pues depende íntegramente del país vecino, Eslovenia.

En la actualidad diferentes estudios muestran que existe una sobreexplotación del acuífero y que sus niveles están descendiendo del orden de 1 o 2 metro cada 10 años. Uno de los primeros pasos será corroborar este efecto.

Previamente al análisis, debido a la gran cantidad de datos de piezómetros iniciales, se realiza un “cluster, seleccionando datos que nos dará una nube de puntos homogénea a lo largo de toda la superficie del acuífero. También se realizara una preparación de los datos de niveles de agua del río, se dividirá la serie histórica de un año en tres periodos diferentes marcados por crecidas o descensos del nivel del agua del acuífero y se correlacionan con el punto de información del río más cercano.

El objetivo de la Tesis es analizar la correlación entre los niveles en el sistema acuífero de Zagreb y los caudales circulantes en un tramo del río Sava, hidráulicamente conectados. Para ello se dispone de datos de series históricas de al menos 120 piezómetros en un área reducida de 388 kilómetros cuadrados. Además se cuenta con la misma serie histórica de al menos 8 estaciones donde se mide la cota del nivel del río en referencia al mar a lo largo de 63 kilómetros de río. La serie histórica a utilizar estará comprendida entre 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2013.

Para desempeñar dicho análisis se utilizaran técnicas estadísticas como; coeficiente de correlación de Pearson, coeficiente de correlación de Spearman y pruebas de hipótesis. Estas técnicas estadísticas nos darán información del grado de correlación entre los niveles en el acuífero y los caudales en el río, incluyendo las dimensiones espacial y temporal en esa correlación.

Además se prevé analizar las correlaciones en las diferentes épocas del año para analizar el grado de dependencia río-acuífero dependiendo de la estación del año y extraer datos del porcentaje de recarga que produce el río por periodos. Más tarde se realizara una interpolación de los resultados mediante interpolación espacial utilizando las técnicas de: Ponderación de Distancia media, Splir y vecino natural, mediante el software ArGis Con el objeto de tener un resultado compacto de la correlación en los diferentes puntos. Por último si los resultados de correlación son aceptables se propondrá una batería de medidas de gestión e infraestructuras para garantizar una estabilidad del acuífero a corto medio plazo.

Con el conjunto de técnicas descritas podremos analizar si puntos de riesgo como campos de pozos de suministro de agua a la población tiene a su vez una dependencia del río y como afecta la regulación de los caudales del río al descenso del nivel freático en estos puntos.

Los resultados obtenidos muestran una alta correlación entre el río y el acuífero. Además de sacar

conclusiones interesantes de los cambios en la correlación dependiendo de la estación del año. Se proponen además hasta 4 actuaciones para asegurar la estabilidad de los niveles del acuífero.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

Zagreb està situada al Nord de Croàcia, té una població de 800.000 persones i està experimentant una explosió demogràfica en els últims anys, la ciutat sencera està construïda sobre l'aqüífer de Zagreb i es proveeix d'aquest sistema. És per això que està augmentant la demanda d'aigua d'aquest recurs i l'aqüífer està començant a ser no sostenible. Al llarg dels anys diferents organismes han fet un esforç per a incrementar el coneixement del sistema. Es tracta d'un aquífer de caràcter alluvial amb una geologia hidrologia i delimitació ben estudiada. Certs estudis anteriors revelen que existeix una correlació entre el riu i l'aqüífer, però fins avui no es coneix la seua dependència i no s'ha estudiat en profunditat. Per a poder analitzar l'aqüífer és necessari estudiar a fons prèviament les seues característiques geològiques, geogràfiques, pedològiques, hidrològiques, climàtiques, la conca del riu Sava fins a Zagreb i les seues gestió. D'aquesta forma si hi ha correlació estadística entre ambdues masses d'aigua, serà més fàcil establir una correlació física també. La gestió de riu Zagreb és un dels principals problemes de l'autodeterminació de la regulació dels cabals al seu pas per Croàcia doncs depèn íntegrament del país veí, Eslovènia. En l'actualitat diferents estudis mostren que existeix una sobreexplotació de l'aqüífer i que els seus nivells estan descendint de l'ordre d'1 o 2 metre cada 10 anys. Un dels primers passos serà corroborar aquest efecte. Prèviament a l'anàlisi, a causa de la gran quantitat de dades de piezómetros inicials, es realitza un “\*cluster”, seleccionant dades que ens donarà un núvol de punts homogènia al llarg de tota la superfície de l'aqüífer. També es realitzarà una preparació de les dades de nivells d'aigua, es dividirà la sèrie històrica d'un any en tres períodes diferents marcats per crescudes o descensos del nivell de l'aigua de l'aqüífer i es correlacionen amb el punt d'informació del riu més proper, les eines utilitzades són coeficient de correlació de Spearman i Pearson. Després d'això se li sotmet a un test estadístic, t-test per a admetre o no els resultats. Finalment mitjançant tècniques d'interpolació es coneixerà els punts més interessants de dependència del riu i la seua localització exacta. Mitjançant aquesta tècnica podrem analitzar sí punts de risc com els camps de pous de subministrament d'aigua a la població té al seu torn una dependència del riu i com afecta la regulació dels cabals del riu al descens del nivell freàtic en aquests punts. Els resultats obtinguts mostren una alta correlació durant els 10 primers mesos de l'any en la totalitat de l'aqüífer. Mentre que en els dos últims mesos de l'any es perd la correlació. Es realitza una anàlisi conceptual per a donar explicació a aquest procés.

### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

Zagreb is situated in the north of Croatia and is the Croatia's capital and in this moment its population is about 800.000 but in the last years it is increasing. The Zagreb Aquifer system is located in the underground of the city. The groundwater level is found near the land surface. whole population of city has gotten water supply of this system, the system is the only source of potable water of the city. In the last years the demand is increasing however the ground water levels are decreasing, the aquifer is not sustainable now.

A long the years a lot of researches have been written about Zagreb aquifer system and in the nowadays the knowledge system is large. It is an alluvial aquifer and the geology and its boundary have been studied a lot. Some before researches show that the aquifer and river have a correlation but until this data it hasn't

been studied hard.

Firstly, the characteristics aquifer will be studied: geographical, geology, pedological, hydrogeology, climatic characteristics, sava river basin because if the statistical tools show a high correlation, also we will be able to do physical correlation.

Secondary, Before to correlation and due to the large amount of data, it was done a cluster of them, selecting those data which made a homogeny cloud of observation wells.

After that, the aim of this thesis is to test stream-aquifer connection by using correlation coefficients in the different areas of the aquifer. In addition, different correlation will be made for each season in order to see the influence of the season in the correlation, the coefficient correlation tools will be: Pearson, Spearman, P-value, t-test.

After it was done the spatial interpolation of the point correlation information using the software ArcGis through different methods like: Inverse Distance Weight, Spline, Natural Neighbor.

To end, we will be able to see the how effects of the flow management Slovenia in the aquifer system.

The results show that river and aquifer have a high correlation during 10 months along the years however in the last two months the aquifer lost the correlation.

**Palabras clave español (máximo 5): Sistema Acuífero de Zagreb, Correlación estadística río-acuífero, Métodos de Interpolación Espacial, Gestión integrada río-acuífero.**

**Palabras clave valenciano (máximo 5): Sistema Aqüífer de Zagreb, Correlació estadística río-aqüífer, Mètodes d'Interpolació Espacial, Gestió integrada río-aqüífer.**

**Palabras clave inglés (máximo 5): Zagreb Aquifer System, coefficient correlation, Spatial Interpolation Methods, integrated managment between rive-aquifer.**

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. SISTEMA ACUÍFERO DE ZAGREB.....	1
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	2
2. ÁREA DE ESTUDIO.....	3
2.1. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS.....	3
2.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....	6
2.2.3 Estratigrafía.....	6
2.2.4 Características geológicas de los límites del acuífero.....	8
2.2.5 Zona no saturada.....	9
2.3. CARACTERÍSTICAS PEDOLÓGICAS.....	9
2.4. HIDROGEOLGÍA.....	11
2.5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	14
2.6. CUENCA DEL RÍO SAVA.....	15
2.6.1 Descripción de la cuenca.....	15
2.6.2 Presas y plantas hidroeléctricas.....	18
3. CONOCIMIENTOS PREVIOS DEL SISTEMA.....	20
3.1 EFECTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA TE-TO.....	20
3.2 PROBLEMA DE CANTIDAD, TENDENCIA NEGATIVA DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEOS.....	24
4. ESTADÍSTICA APLICADA.....	27
4.1. INTRODUCCIÓN.....	27
4.2. INTRODUCCIÓN A LA REGRESION LINEAL Y LOS COEFICIENTES DE CORELACIÓN.....	28
4.3. VARIABLE DEPENDIENTE E INDEPENDIENTE.....	28
4.4.2 Coeficiente de determinación ( $r^2$ ).....	30
4.5 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN.....	31
4.3.2 Spearman.....	32
4.3.1 Pearson.....	34
4.6 ANÁLISIS DE INFERENCIA ESTADISTICA.....	36
4.6.1 PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	37
5. HERRAMIENTAS DE INTERPOLACIÓN.....	39
6. DATOS.....	40
6.1 DATOS DE LOS NIVELES DE AGUA EN EL RÍO.....	40

6.2 DATOS DE LOS NIVELES DE AGUA EN EL ACUÍFERO .....	42
6.3 OTROS DATOS.....	42
7. ANALISIS Y TRANSFORMACIÓN DE DATOS.....	43
7.1 INTERPOLACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL DEL RÍO.....	43
7.2 SELECCIÓN DE LOS PIEZOMETROS PARA EL ESTUDIO.....	45
7.3 ANÁLISIS DEL TIPO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS VARIABLES.....	46
8. SELECCIÓN DE LOS PERIODOS DE ANÁLISIS.....	48
8.2 PERIODOS .....	49
8.2.1 PRIMERA ITERACIÓN.....	50
8.2.2 SEGUNDA ITERACIÓN.....	51
9. METODOLOGÍA.....	52
9.1 MODELOS .....	52
9.2 EMPAREJAMIENTO DE VARIABLES.....	57
9.3 PROGRAMACIÓN DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN .....	58
9.4 PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	58
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	59
10.1 PRIMER MODELO .....	59
10.2 SEGUNDO MODELO .....	65
11. PROPUESTA DE INFRAESTRUCTURA.....	68
12. CONCLUSIONES .....	71
REFERENCES .....	75

## ÍNDICE ANEXOS

Anejo 1 - Puntos seleccionados.

Anejo 2 - Puntos correlacionados.

Anejo 3 - Interpolación con coeficiente de correlación de Pearson y método de interpolación Vecino Natural, para el periodo completo.

Anejo 4 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de interpolación de Vecino Natural, para el periodo completo.

Anejo 5 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de Vecino Natural para el periodo 1.

Anejo 6 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de Vecino Natural para el periodo 2.

Anejo 7 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de Vecino Natural para el periodo 3.

Anejo 8 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de Vecino Natural, periodo 1, modelo 2.

Anejo 9 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de Vecino Natural, periodo 1, modelo 2.

Anejo 10 - Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de Vecino Natural, periodo 3, modelo 2.

Anejo 11 - Área afectadas y propuesta de medidas, infraestructuras.

Anejo 12 - Resultados numéricos modelo 1.

Anejo 13 - Resultados numéricos modelo 2.



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. 1</b> <i>Modelo en 3D del Sistema acuífero de Zagreb (VLAHOVIĆ, 2008)</i> .....	2
<b>Figura 2. 1</b> <i>Situación Geográfica del país de Croacia y de la ciudad de Zagreb (Nakic, 2013)</i> .....	4
<b>Figura 2. 2</b> <i>Condiciones de los límites del acuífero (Deliverable 4.2, GENESIS, 2011).</i>	5
<b>Figura 2. 3</b> <i>Corte trasversal del acuífero con sus cotas (BAČANI. 2009)</i> .....	5
<b>Figura 2. 4</b> <i>Mapa simplificado de la geomorfología y geología de Zagreb y parte de Croacia (SOLLITTO, 2010).</i> .....	7
<b>Figura 2. 5</b> <i>Corte geológico resumido del sistema acuífero de Zagreb (POSAVEC, 2006).</i> .....	8
<b>Figura 2. 6</b> <i>Mapa de isopiezas de la distancia del nivel freático a la superficie (GENESIS, 2011).</i> .....	9
<b>Figura 2. 7</b> <i>Mapa pedológico de Zagreb y parte de Croacia. (Bogunavíc, 1998). Simplified by Sollitto, 2010)</i> .....	10
<b>Figura 2. 8</b> <i>Espesor del acuitardo de Norte de Croacia (BRKIĆ., 2010).</i> .....	12
<b>Figura 2. 9</b> <i>Mapa de conductividad hidráulica (Fuente: elaboración propia).</i> .....	13
<b>Figura 2. 10</b> <i>Mapa de líneas equipotenciales (ORAMAS, 2016)</i> .....	14
<b>Figura 2. 11</b> <i>Grafico de temperatura y precipitación a lo largo del año (Fuente: elaboración propia)</i> .....	15
<b>Figura 2. 12</b> <i>Elevación de la Cuenca del río Sava. Modificada por Miguel Soriano acuerdo a (INTERNATIONAL SAVA RIVER BASIN COMMISSION (ISRBC) at al. 2013).</i> .....	16
<b>Figura 2. 13</b> <i>Sub-cuencas del Río Sava. Modificada por Modified by Miguel Soriano de acuerdo a (INTERNATIONAL SAVA RIVER BASIN COMMISSION (ISRBC) at al. 2013).</i> .....	18
<b>Figura 2. 14</b> <i>Distribución espacial de la actuales y futuras presas</i> .....	19
<b>Figura 2. 15</b> <i>The Sava River longitudinal profile in the reach between river kilometre 685 and km 730 (Oskoruš, 2012)</i> .....	19
<b>Figura 3. 1</b> <i>Comparación de los niveles de agua del río Sava y los niveles de agua del acuífero usando piezómetros en las vecindades del cauce. (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)</i> .....	20
<b>Figura 3. 2</b> <i>Niveles y tendencia de un piezómetro cercano al río antes y tras la construcción del presa TE-TO (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)</i> .....	21
<b>Figura 3. 3</b> <i>Piezómetro situado al suroeste de la presa TE-TO (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)</i> .....	22
<b>Figura 3. 4</b> <i>Diferencia entre el escenario posterior y anterior a la construcción de la presa (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)</i> .....	23
<b>Figura 3. 5</b> <i>Localización de la presa y mapa 2 de equipotenciales. Muestra el cambio en la dirección del flujo subterráneo y sobretodo en las vecindades a la presa. (Deliverable D4.2 Version 2.0, 2011, GENESIS).</i> .....	24
<b>Figura 3. 6</b> <i>Tendencias negativas en diferentes piezómetros (Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, Croatiaal. 2010)</i> .....	25

<b>Figura 3. 7</b> Serie histórica de precipitaciones desde 1997 (Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, Croatiaal. 2010) .....	26
<b>Figura 3. 8</b> Serie histórica de extracciones (Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, Croatiaal. 2010) .....	26
<b>Figura 4. 1</b> Uso de la correlación de Spearman, (Monica Alejandra Mondraón Barrera, 2014) .....	32
<b>Figura 4. 2</b> <i>Uso de la correlación de Spearman, (Monica Alejandra Mondraón Barrera 2014 a, basada en Hernández Sampieri Y Fernández Collado, 1998).</i> .....	34
<b>Figura 4. 3</b> <i>Correlación entre X e Y, no – lineal.</i> .....	35
<b>Figura 4. 4</b> <i>Modelos estadísticos para la prueba de hipótesis.</i> .....	37
<b>Figura 6. 1</b> <i>Puntos de control del río (fuente: elaboración propia)</i> .....	41
<b>Figura 6. 2</b> <i>Series históricas del río 2013 (fuente: elaboración propia)</i> .....	41
<b>Figura 6. 3</b> <i>Todos los piezómetros de control (fuente: elaboración propia)</i> .....	42
<b>Figura 7. 1</b> <i>Puntos finales de control en el río (fuente: elaboración propia)</i> .....	44
<b>Figura 7. 2</b> <i>7.2 Puntos seleccionados (Soriano, 2016)</i> .....	45
<b>Figura 7. 3</b> <i>Función de densidad de probabilidad del variable nivel en el rio con la estación Kosnica (fuente, elaboración propia).</i> .....	47
<b>Figura 7. 4</b> <i>función de densidad de probabilidad de la variable nivel en el piezómetro 157 (fuente: elaboración propia).</i> .....	47
<b>Figura 7. 5</b> <i>función de distribución de la variable nivel en el piezómetro 150 (fuente: elaboración propia)</i> .....	48
<b>Figura 8. 1</b> <i>Serie historia del nivel freatico 2012 y 2013(Hruš, 2015)</i> .....	49
<b>Figura 8. 2</b> <i>División de periodos primera iteración (Fuente: elaboración propia).</i> .....	50
<b>Figura 8. 3</b> <i>Piezometros que pasan la prueba de hipótesis. (fuente: elaboración propia)</i> .....	51
<b>Figura 8. 4</b> <i>Selección final de los diferentes periodos (fuente: elaboración propia).</i> ...	52
<b>Figura 9. 1</b> <i>Gradiente hidráulico, distribución espacial (Fuente: elaboración propia)</i> .....	55
<b>Figura 9. 2</b> <i>Campo de velocidades, distribución espacial (fuente: elaboración propia)</i>	56
<b>Figura 9. 3</b> <i>Tiempos de desfase, desde rio hasta los piezómetros de control en días (Fuente: elaboración propia).</i> .....	56

<b>Figura 10. 1</b> <i>Interpolación con el coeficiente de correlación de Pearson y con el método de vecino natural para el periodo completo (Fuente elaboración propia)</i> .....	60
<b>Figura 10. 2</b> <i>Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de interpolación de vecino natural para el periodo completo (Fuente: elaboración propia)</i>	60
<b>Figura 10. 3</b> <i>Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de interpolación de Split para el periodo completo (Fuente: elaboración propia)</i> .....	61
<b>Figura 10. 4</b> <i>Interpolación con el coeficiente de correlación de Spearman y con el método de IDW para el periodo completo (elaboración propia)</i> . ....	62
<b>Figura 10. 5</b> <i>Interpolación con el coeficiente de correlación de Spearman y con el método de interpolación de vecino natural para el periodo 1 (Fuente, elaboración propia)</i> . ....	63
<b>Figura 10. 6</b> <i>Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y con el método de vecino natural para el periodo 2. (fuente: elaboración propia)</i> .....	64
<b>Figura 10. 7</b> <i>Interpolación solo con puntos de correlación positiva con el coeficiente de correlación de Spearman y con el método de interpolación de vecino natural para el periodo 3. (fuente elaboración propia)</i> .....	65
<b>Figura 10. 8</b> <i>Interpolación con coeficiente de correlación Spearman y método de interpolación de vecino natural para el periodo completo y Modelo 2 (fuente: elaboración propia)</i> .....	66
<b>Figura 10. 9</b> <i>Interpolación con coeficiente de correlación de Pearson y con método de interpolación de vecino natural para el periodo completo y Modelo 2. (fuente: elaboración propia)</i> .....	66
<b>Figura 10. 10</b> <i>Interpolación con coeficiente de correlación de Pearson y método de interpolación de Vecino Natural para el periodo 3 y método 2. (fuente: elaboración propia)</i> .....	67
<b>Figura 10. 11</b> <i>Áreas de interés del acuífero y tramos de interés del río (fuente: elaboración propia)</i> . ....	69
<b>Figura 10. 12</b> <i>Propuesta futuras infraestructuras (fuente: elaboración propia)</i> .....	70

# **1. INTRODUCCIÓN.**

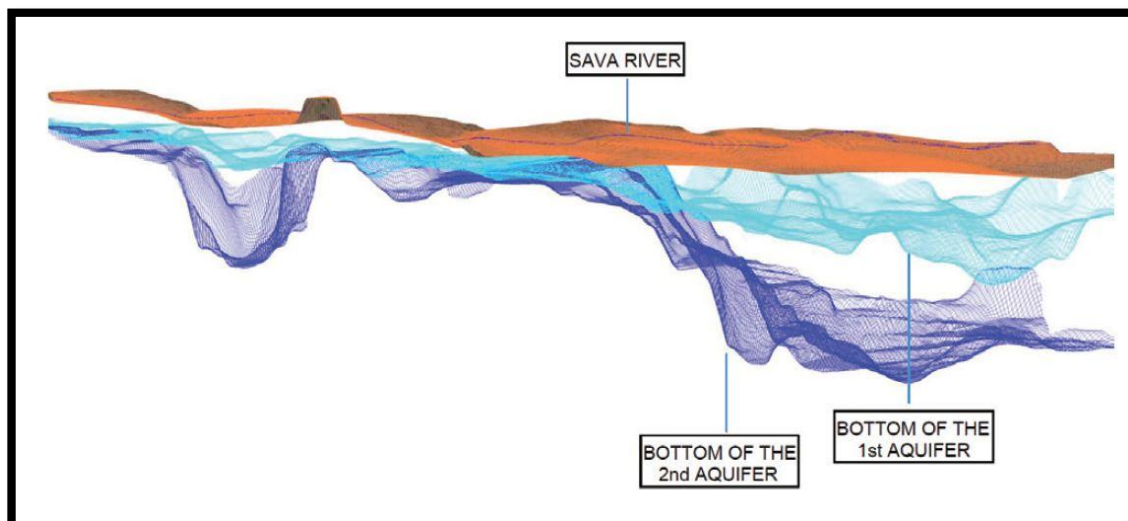
## **1.1. SISTEMA ACUÍFERO DE ZAGREB.**

El área de estudio está situada en las inmediaciones de la ciudad de Zagreb, capital de Croacia. En la actualidad su población asciende a 800.000 persona y con una tasa de crecimiento cada vez mayor. El acuífero se sitúa bajo la ciudad y el nivel freático está próximo a la superficie.

La delimitación del acuífero viene marcada por la orografía montañosa del lugar. El sistema se sitúa entre Mt. Medvednica al norte y las colinas de Vukomeričke Gorice al sur. Podsused en el Oeste y Rugvica en el Este. Además se trata de un sistema íntegro formado también por la componente superficial, el río Sava, el cual cede agua al acuífero debido a la conectividad. A su vez el río Sava cruza la ciudad de Zagreb desde el noroeste hasta sureste, el cual divide el acuífero en la margen derecha e izquierda con una longitud aproximada en el tramo de 30 Km.

El abastecimiento de la ciudad de Zagreb opta por el recurso subterráneo y su capacidad de autodepuración debido a que el recurso superficial tiene altas concentraciones de contaminantes. La ciudad de Zagreb cuenta con varios campos de pozos distribuidos en diferentes distritos de la ciudad.

El sistema acuífero de Zagreb está dividido en dos capas; la capa más cercana a la superficie cuenta con un espesor comprendido entre los 5 y 10 metros en la parte oeste mientras, que en la parte este alcanza los 40 metros. El segundo acuífero logra los 20 metros en el oeste y va creciendo en espesor hasta los 60 metros en la parte más al Este. (Ver figura 1.1)



**Figura 1. 1** Modelo en 3D del Sistema acuífero de Zagreb (VLAHOVIĆ, 2008)

El sistema acuífero es la única forma de asegurar el abastecimiento a Zagreb para las demandas agrícolas, urbanas y de industria. El fallo del sistema, agotamiento del acuífero o no sostenibilidad del mismo podría causar déficits importantes en el futuro. Sobre todo en el suministro de agua a la ciudad.

## 1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El estudio tiene como uno de los objetivos principales indagar en el conocimiento de la relación que guarda el recurso superficial con el subterráneo y como afecta la regulación del recurso superficial al subterráneo.

El acuífero de Zagreb ha sido estudiado a lo largo de los años y monitoreado desde 1950. Siendo accesible la información acerca de su geología, delimitación, características hidrogeológicas y niveles. Este control se debe a su característica de ser la única fuente de agua para abastecer a la ciudad. En cambio la parte del sistema superficial brinda menos información para su estudio, debido a que el país vecino, Eslovenia tiene en sus manos la mayoría de la regulación, es un aliciente indagar en los problemas que existen en Europa con los ríos transfronterizos y compara con los sistemas de gestión de España.

Varios estudios han estimado que alrededor del 70 % del agua subterránea proviene de la filtración del río Sava. (MILETIĆ & BAČANI, 1999), pero hasta la actualidad no se ha estudiado en profundidad la relación entre río-acuífero. Uno de los objetivos principales es evaluar mediante técnicas estadísticas si existe correlación entre ambos recursos para más tarde brindar a la universidad de Zagreb una herramienta en forma de mapa que

muestre la relación en los diferentes puntos del acuífero y que sirva para líneas de investigaciones futuras.

Para la ejecución del estudio se utilizan los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson, y se estudiará la variación espacial de los coeficientes. Para completar todavía más el estudio se probarán el modelo en las diferentes estaciones del año para comprobar la influencia o la correlación en cada periodo.

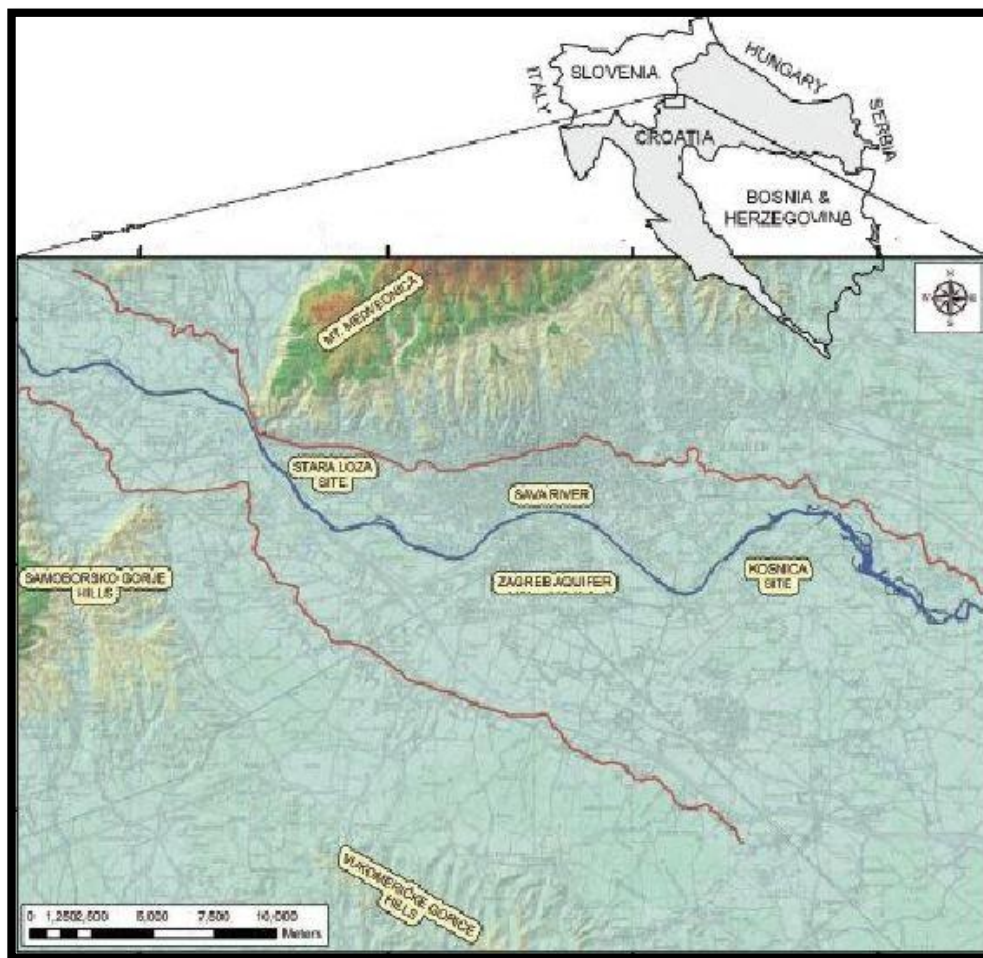
Otra meta más concreta del estudio es comprobar si en las áreas cercanas a los campos de pozos hay correlaciones altas y de ser así proponer actuaciones estratégicas en diferentes tramos del río que suban el nivel y por lo tanto modifiquen la lámina de agua subterránea. Por ende subir el nivel de agua subterránea producirá un ahorro energético en los bombeos de los campos de pozos, además de mejorar la sostenibilidad del acuífero. En la actualidad hay construida una presa en las inmediaciones del río Sava a su paso por Zagreb, la cual fue construida para otro fin, pero que consigue modificar la forma de operar del acuífero. Otro de los objetivos es documentar esta actuación pasada para conocer si una actuación futura parecida produciría efecto en el sistema acuífero.

## **2. ÁREA DE ESTUDIO**

### **2.1. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS**

El Sistema acuífero de Zagreb está localizado al Norte de la república de Croacia, debajo del curso del río Sava. Tiene una cobertura aproximada de 350 Km<sup>2</sup> (Ver Figura 2.1)

El acuífero de Zagreb está situado en una llanura aluvial. La región está caracterizada por una alta variabilidad en su litología y por diferentes usos del suelo. La parte norte y noroeste está caracterizada por una morfología montañosa cuya topografía varía desde unos pocos cientos de metros en la parte de Mt Žumberak, hasta más de 1000 metros de elevación en la parte de Mt Medvednica. La parte sureste ofrece un paisaje aterrazado con colinas suavizadas cuyas elevaciones se encuentran entre los 150 y 250 m.s.n.m mientras que en el resto de la región del acuífero no se encuentran elevaciones importantes. Se trata de una llanura de inundación que no sobrepasa los 100 metros de altitud. (Figura 2.1).



**Figura 2. 1** Situación Geográfica del país de Croacia y de la ciudad de Zagreb (Nakic, 2013)

El área más estudiada del acuífero es una pequeña parte de un Sistema mayor, es decir un volumen de control. El sistema acuífero de Zagreb cuenta con fronteras impermeables que marcan los límites del acuífero, pero también en otras partes, las delimitaciones están conformadas por aportaciones de caudales subterráneos externos (inflow) o cesiones de caudal a otras masas de agua subterráneas (outflow). El sistema de estudio solo tiene una parte impermeable situado en la delimitación norte (Ver Figura 2.2).

Las fronteras del Sistema acuífero de Zagreb se describen a continuación:

- En el Oeste, cerca de Podsused, el acuífero de Zagreb está en contacto con el acuífero de Samobor (Ver Figura 1.1).
- En la parte oriental baja, el acuífero cede agua hacia el este (Outflow). Esto es debido a que no se trata de un límite del acuífero completamente impermeable. (Ver Figura 2.2)
- A lo largo del borde sur y suroeste del sistema acuífero se encuentra una entrada de agua de un Sistema exterior (Inflow), (Ver Figura 2.2).
- En el borde este existe otro tramo de entrada de agua (Inflow) (Ver figura 2.2).

- La delimitación norte del acuífero es completamente impermeable formada por depósitos arcillosos (Ver Figure 2.2).

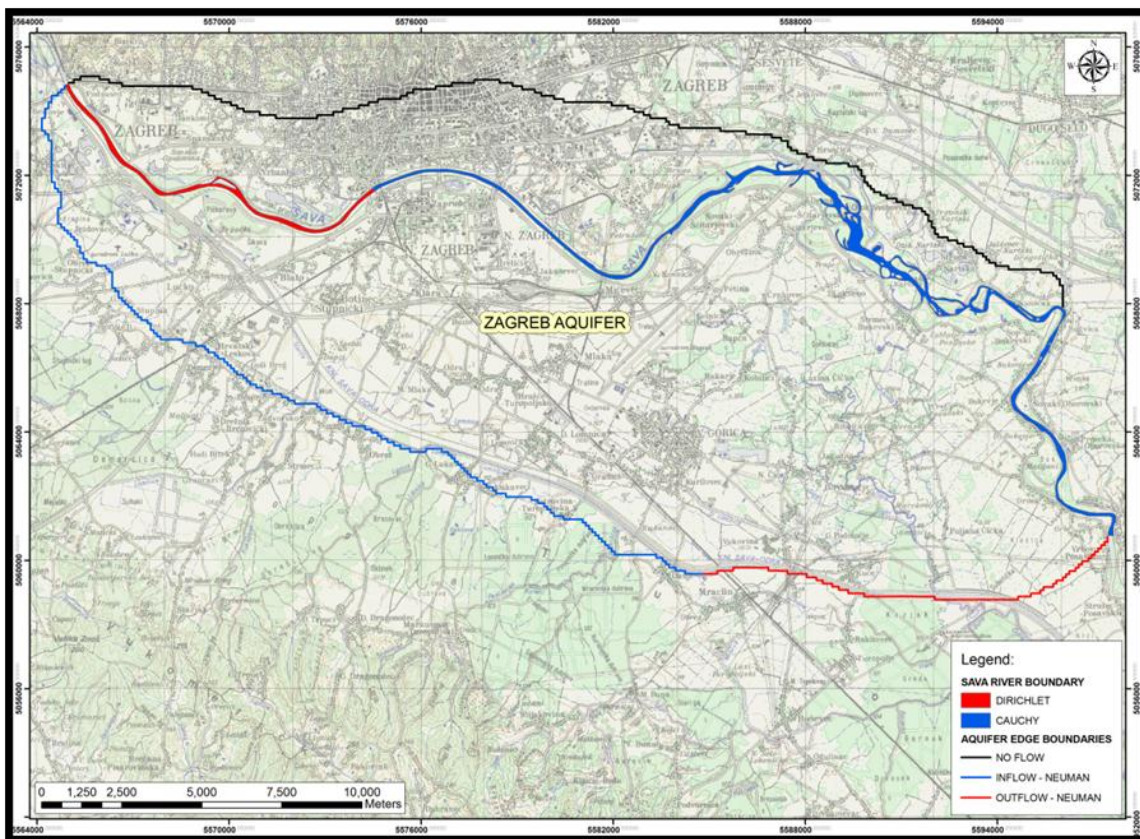


Figura 2. 2 Condiciones de los límites del acuífero (Deliverable 4.2, GENESIS, 2011).

La volumetría del sistema acuífero se puede imaginar a partir de las figuras 1.1 2.2 y 2.3

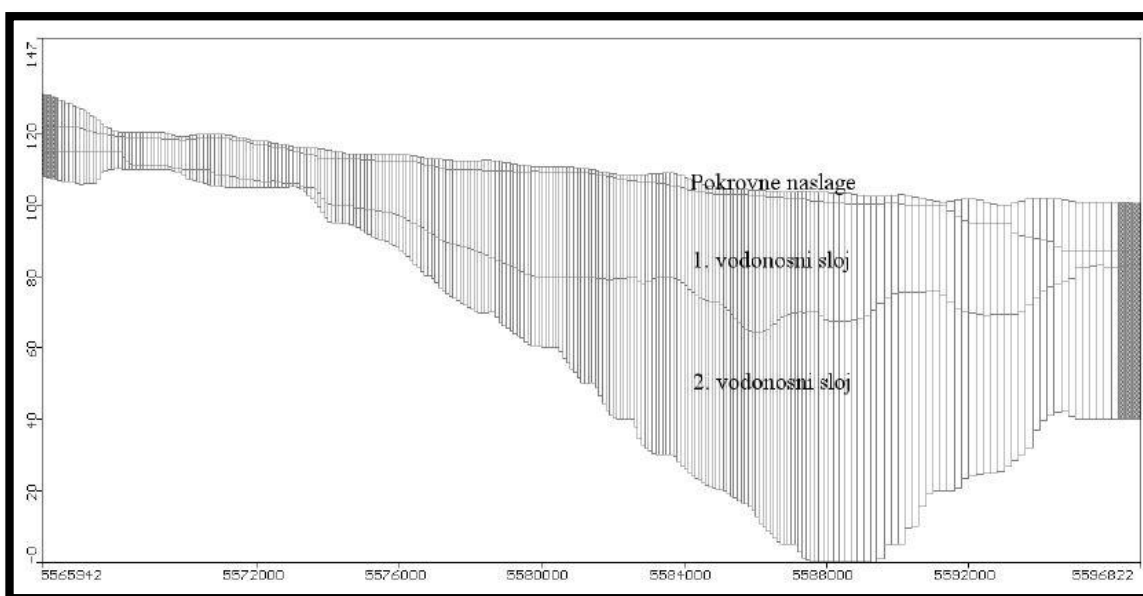


Figura 2. 3 Corte trasversal del acuífero con sus cotas (BAČANIĆ. 2009)



## 2.2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

### 2.2.3 Estratigrafía

Para conocer el funcionamiento y el campo de velocidades del acuífero es necesario indagar en la geología de la zona y estudiar la formación del acuífero, recurriendo a la estratigrafía para tener una base sólida en el estudio de la hidrogeología del lugar.

El área de estudio tiene una alta actividad tectónica debido a las fallas que se encuentran alrededor y que han dado forma a las cadenas montañosas cercanas a la parte norte del área de estudio. El resultado de la actividad tectónica a lo largo de los años ha dado lugar a depresiones y elevaciones locales (Velić & Saftić, 1996).

Durante el Pleistoceno más joven el área de estudio estaba principalmente cubierta por lagos y pantanos. Entre el periodo final del Pleistoceno y el comienzo del Holoceno tuvieron lugar eventos extremos de movimientos de las placas tectónicas que produjeron la depresión del río Sava. Al mismo tiempo en la parte norte de la actual Zagreb los depósitos de los sistemas lacustres de los pantanos y lagos del Neogeno comenzaron a descender, contribuyendo a la creación de la

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	EDAD ABSOLUTA millones de años
CENOZOICA	Cuaternario	Holoceno	0,01
		Pleistoceno	1,8
	Terciario	Plioceno	5,0
		Mioceno	22,5
		Oligoceno	37
		Eoceno	55
Paleoceno	65		
MESOZOICA (Secundaria)	Cretácico		141
	Jurásico		195
	Triásico		230
PALEOZOICA (Primaria)	Pérmico		280
	Carbonífero		345
	Devónico		395
	Silúrico		435
	Ordovícico		500
	Cámbrico		570
PRECÁMBRICO			4 600

depresión del río Sava y permitiendo crear un gran cauce natural para las nuevas escorrentías generadas en las montañas de los Alpes, que alimentarían de sedimentos la llanura.

La composición mineralógica y está definida principalmente por sedimentos del cuaternario, con una componente de silicio dominante que apunta al área de origen en las montañas de los alrededores, sobre todo en los Alpes Julianos. Estos sistemas montañosos fueron sometidos a lo largo de los años a procesos erosivos producidos por a la lluvia y el viento. Más tarde fueron transportados por la escorrentía a través de la actual cuenca del río Sava hasta que al llegar a la depresión de Zagreb perdían velocidad y sedimentaban

(VELIĆ & SAFTIĆ, 1991). La sedimentación era cíclica debido a los diferentes periodos climáticos que se daban en la época, de tal forma que las gravas y arenas eran depositadas durante el periodo cálido-húmedo, donde había un gran transporte. En cambio se encuentran capas intermedias de sedimentos de grano fino (limo, arcina, arenas de grano fino) que eran depositados durante los períodos frio-secos debido a la poca fuerza de transporte del flujo de agua. Esto se puede observar en los diferentes estudios litológicos verticales hechos hasta la fecha. Además diversos autores mencionan que esta heterogeneidad está alterada por la influencia de los movimientos tectónicos (VELIC, 1999). Estos cambios caracterizaron al acuífero con una alta heterogeneidad y anisotropía. Durante el final del Pleistoceno y el Holoceno temprano, la barrera tectónica oeste de Zagreb se rompió lo que permitió al río Sava entrar en la zona de Zagreb y los sedimentos de grano grueso comenzaron a depositarse en las partes más altas del futuro acuífero. El componente de carbonato de zonas alpinas es dominante dentro de estos sedimentos.

La formación donde se ubica el curso del río Sava y Sava-Odra y por lo tanto el acuífero de Zagreb es de carácter relativamente joven comparado con las formaciones del resto de la región. (Ver Figura 2.4)

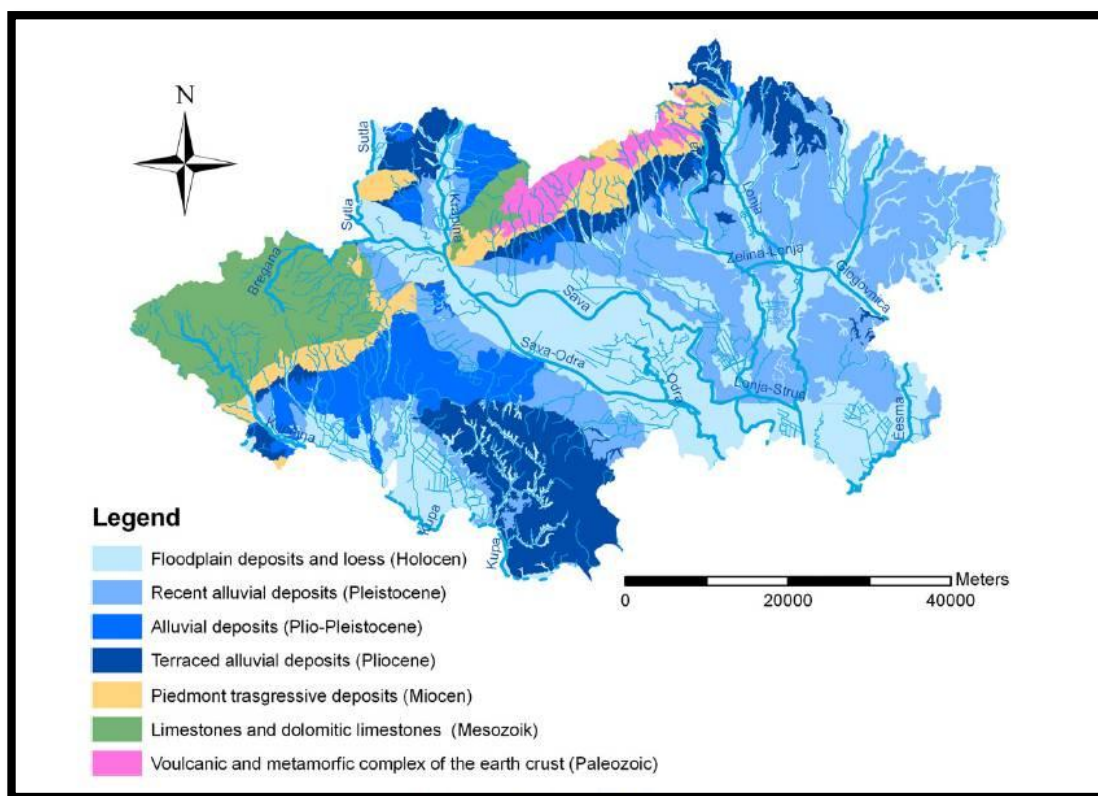
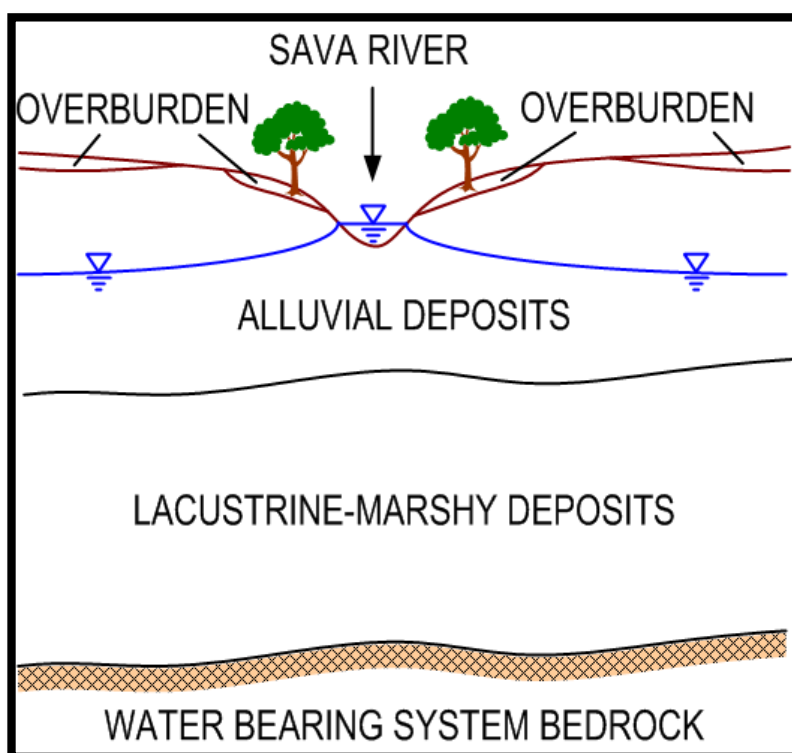


Figura 2. 4 Mapa simplificado de la geomorfología y geología de Zagreb y parte de Croacia (SOLLITTO, 2010).

### 2.2.4 Características geológicas de los límites del acuífero

Las fronteras geológicas del acuífero tienen las siguientes características; la parte norte está constituida por un depósito de arcillas de carácter altamente impermeable, que proviene de depósitos del terciario de la ladera sur de Mt. Medvednica (Ver Figura 2.4). A lo largo del oeste del acuífero hay una pobre comunicación entre el acuífero de Zagreb y el acuífero Samobor debido al ligero espesor de la unión (figura 1.1). En la parte este del sistema hay una salida de flujo a otra unidad geológica, el caudal es reducido debido a la alta impermeabilidad. En la parte sur, el acuífero de Zagreb toca con los sedimentos clásticos proveniente de las terrazas de Stupnik de las partes altas de las capa de Paludin que forma el noreste de las colinas de Vukomeričke Gorice

Dos capas principales pueden ser distinguidas en un corte geológico del acuífero: La capa más cercana a la superficie y por lo tanto más reciente es un depósito aluvial compuesto principalmente por material de grano grueso. La segunda capa se formó en el pleistoceno, caracterizado por un sistema lacustre, debido a los lagos y pantanos. Estos con el tiempo sedimentaron el material fino que tenían en suspensión, limos y arcillas. Por último la cama del acuífero está compuesto por un depósito impermeable (Ver Figura 2.5).



**Figura 2. 5** Corte geológico resumido del sistema acuífero de Zagreb (POSAVEC, 2006).

### 2.2.5 Zona no saturada

El nivel freático se encuentra cerca de la superficie. El área entre el nivel freático y la superficie es conocida como zona no saturada. El espesor de la zona no saturada del sistema acuífero varía desde los 8 metros en la NO hasta los 2 metros en la SE (Ver Figura 2.6), por lo cual se asume que el nivel freático está por encima del suelo de la primera capa geológica. No obstante en la parte noroeste durante los periodos estivales puede estar en la capa inferior. Aunque en algunas áreas alcanza hasta los 15 metros. La zona no saturada, se encuentra conformada principalmente por grava y arena y una pequeña parte de arcilla. La parte más alta contiene principalmente material arenoso y limoso. En ambas partes el material es intersectado con pequeñas capas de arcilla.

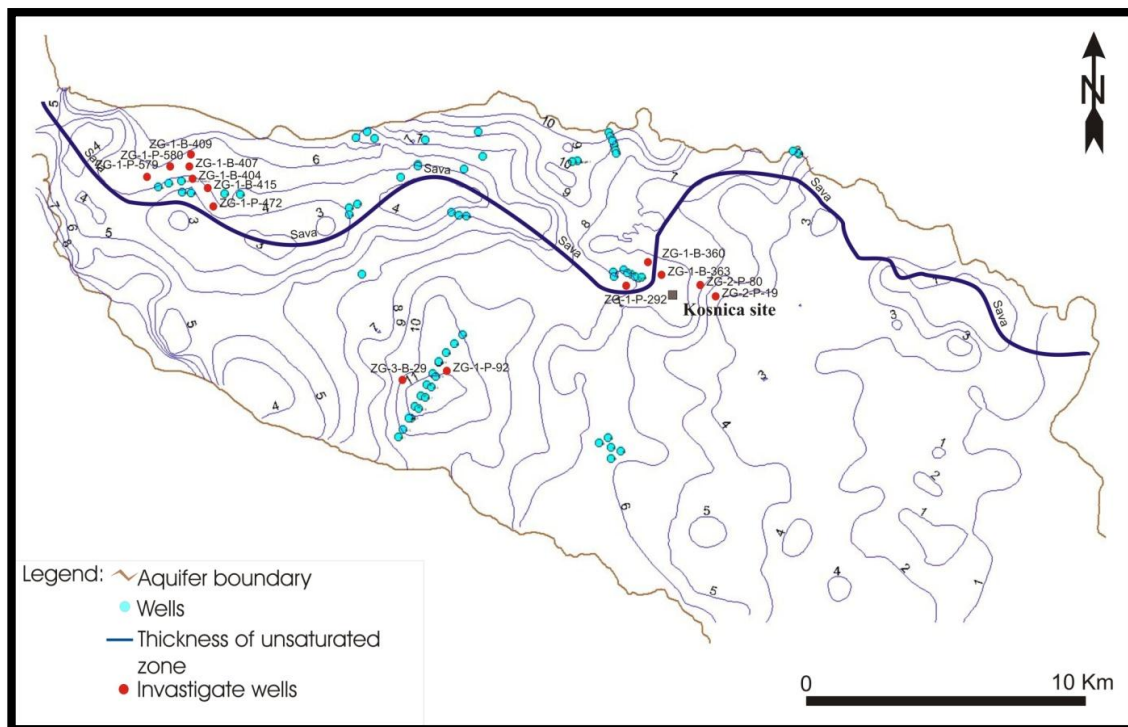
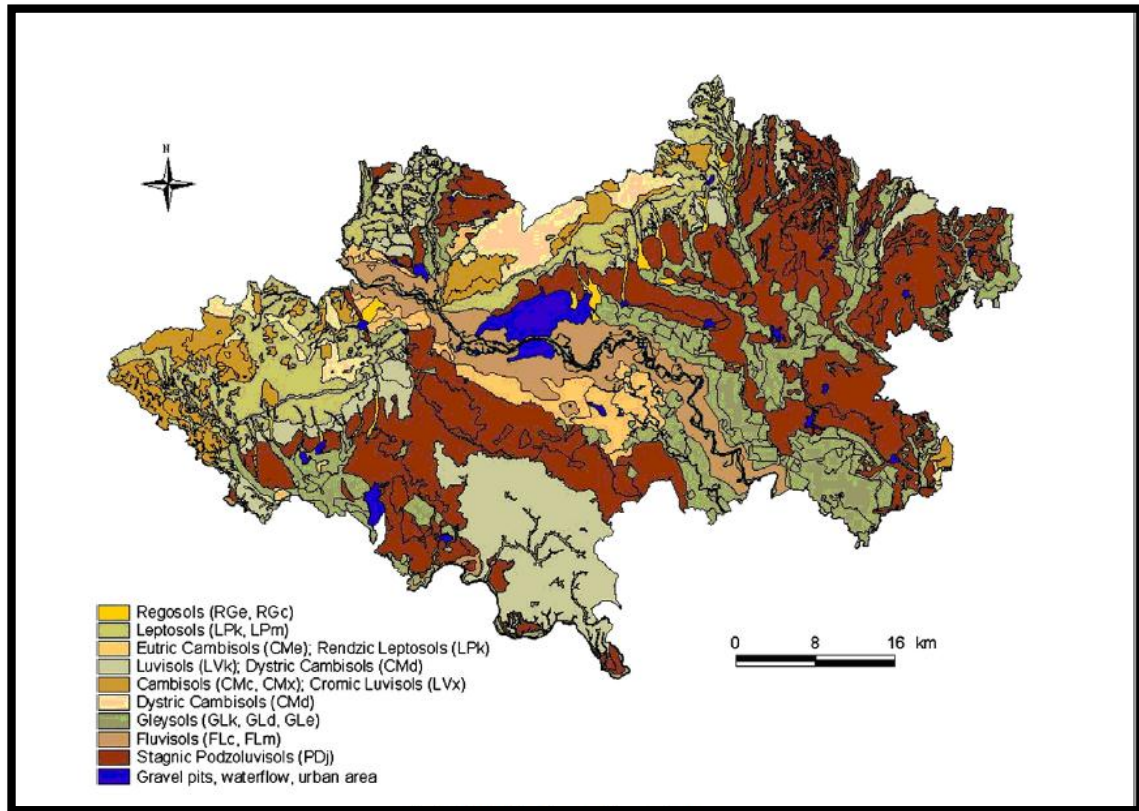


Figura 2. 6 Mapa de isopiezas de la distancia del nivel freático a la superficie (GENESIS, 2011).

### 2.3. CARACTERÍSTICAS PEDOLÓGICAS

Resumen de las características del suelo en su ambiente natural, con el objetivo de conocer que áreas pueden ser potencialmente contaminantes por la agricultura. Ésta información ayuda a plantear escenarios futuros de reubicación de los pozos de bombeo de abastecimiento a la ciudad.

En el área del Sistema acuífero dos unidades pueden ser distinguidas: Fluviosoels, Cambisol, (Bogunović, 1998), (Ver Figura 2.7).



**Figura 2. 7** Mapa pedológico de Zagreb y parte de Croacia. (Bogunović, 1998). Simplified by Sollitto, 2010)

- Fluviosoels; Suelen desarrollarse sobre depósitos aluviales. El material lo constituyen depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial, lacustre o marino. Se encuentran periódicamente inundadas. El perfil es de tipo AC con evidentes muestras de estratificación que dificultan la diferenciación de los horizontes, aunque es frecuente la presencia de un horizonte Ah muy conspicuo. Los rasgos redoximórficos son frecuentes, sobretodo en la parte baja del perfil. Los fluvisoles suelen utilizarse para cultivos de consumo, huertas, frecuentemente para pastos.

- Cambisol; se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas. Entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial y coluvial. El perfil es de tipo ABC. El horizonte B se caracteriza por una débil a moderada alteración del material original, por la usencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica y compuestos de hierro y aluminio, de origen iluvial. Permiten un amplio rango de posibles usos agrícolas.

## 2.4. HIDROGEOLOGÍA

El acuífero de Zagreb ha sido explotado como un recurso para el abastecimiento de agua de la ciudad y como un manantial destinado a suplir el riego de la agricultura.

La extracción anual del acuífero excede las reservas de agua subterráneas que son renovables. Aunque no se puede afirmar sin un análisis más profundo que el acuífero esté sobrexplotado. El volumen de reservas de agua subterráneas renovables ascendía a  $107 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  en el periodo desde 1997 hasta 2007. Mientras que se ha estimado que la extracción por bombeo anual asciende a  $125 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  debido a los 6 campos de pozos que rodean la ciudad. La reserva permanente de recurso no renovable se calculó para el año 1977 en  $1.81 \times 10^9 \text{ m}^3$  y en 2007 fue de  $1.68 \times 10^9 \text{ m}^3$ , que estable una disminución en las reservas de agua subterránea de un 7% (BAČANI et al., 2010).

La recarga del acuífero proviene principalmente de las siguientes fuentes, la cuales están ordenadas por porcentaje de contribución: (1) infiltración desde el río Sava, (2) precipitación, (3) infiltración de las pérdidas de la red de abastecimiento de la ciudad de Zagreb, (4) entradas de agua de los límites del acuífero y entrada desde el acuífero de Samobor..

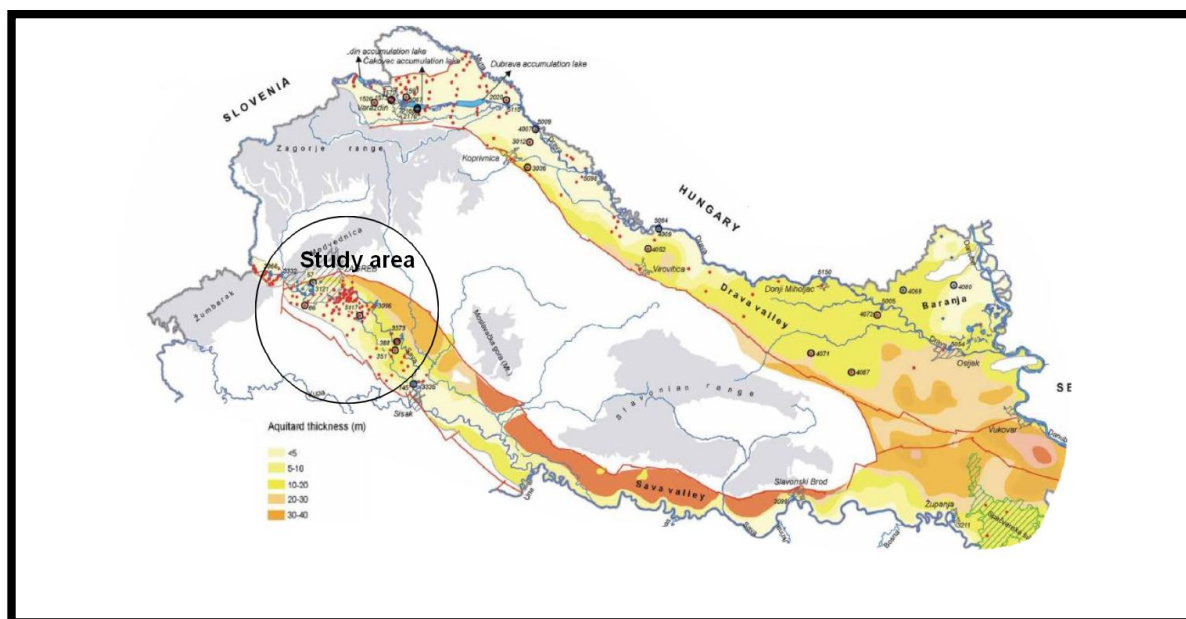
Las condiciones hidrogeológicas y de conductividad hidráulica de los materiales del cuaternario pueden ser divididas en tres unidades distintas:

1. La capa más alta del acuífero está formada por arcilla y limos en un gran porcentaje. Esta capa tiene las características de un acuitardo debido al gran cantidad de material semipermeable. El acuitardo tiene un espesor menor a un metro en la parte oeste, incluso en la zona de estudio hay áreas en las que no existe. Sin embargo en la parte oriental el espesor aumenta hasta los 50 o 70 metros (Ver Figura 2.8), por lo cual no se ha tenido en cuenta en los cálculos y análisis.
2. La capa más importante dentro de la delimitación del sistema acuífero de Zagreb pertenece al periodo del holoceno y está compuesta por gravas de tamaño medio

mezcladas con arena. El nivel freático se encuentra en esta capa y la profundidad de los pozos también. Por lo cual es la de mayor interés. Tiene una alta conductividad hidráulica debido a su geología. La capa alcanza entre 5 y 10 metros en el oeste mientras que llega hasta los 40 metros en la parte este. (Ver Figura 2.13)

3. Para finalizar, la capa más profunda del acuífero o segundo acuífero proviene de la mitad y parte alta del Pleistoceno. Se trata de una capa con una alteración vertical de gravas, arenas y arcillas provenientes de las montañas cercanas. Esta capa alcanza los 20 metros de espesor en el oeste y llega hasta los 60 en el este. Se trata de la capa más grande del Sistema acuífero pero debido a su profundidad no es utilizada en la explotación del acuífero (Ver Figura 2.3).

Anteriormente, el Sistema acuífero tuvo una ligera capa de material impermeable en el techo. Esto permitía proteger al sistema de posibles fuentes de contaminación superficial como pozos ciegos, nitratos, fósforos o pesticidas proveniente del riego. Esta parte del sistema ha sido eliminada con el paso de los años en algunas partes del acuífero, mientras que en otros lugares todavía permanece.



**Figura 2. 8** Espesor del acuitardo de Norte de Croacia (BRKIĆ., 2010).

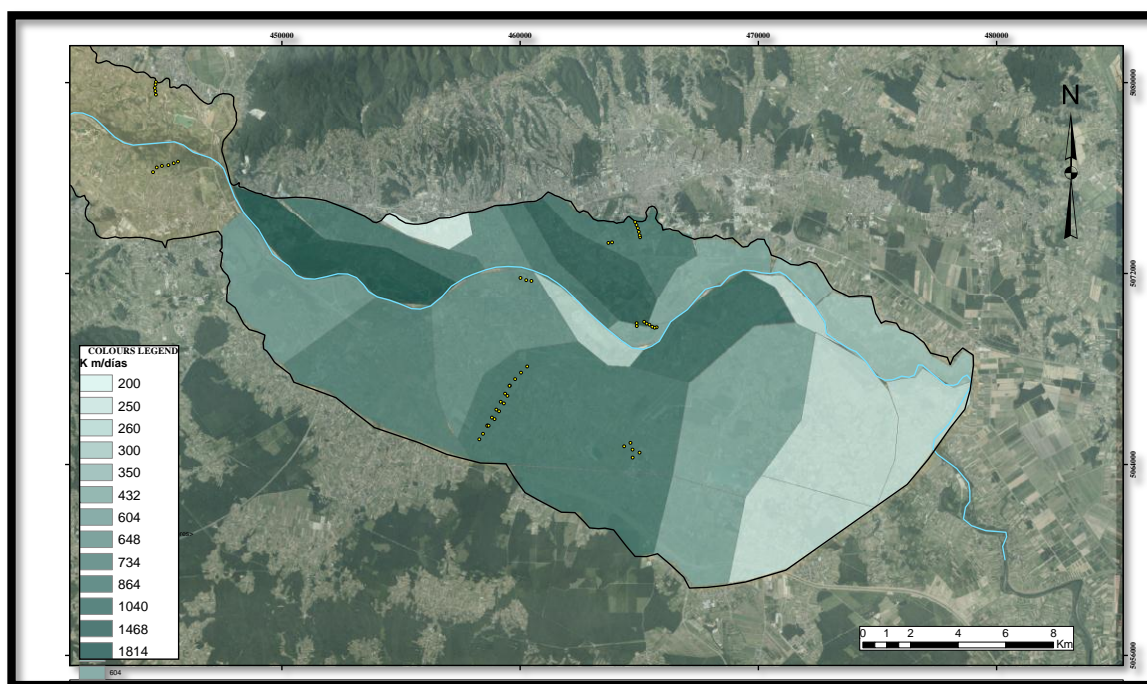
En el apartado de hidrogeológica de estudios anteriores se nombra que el río guarda una relación con el acuífero, pero que no se ha cuantificado ni probado matemáticamente hasta la fecha.

El río Sava cruza un depósito aluvial del holoceno caracterizado por una alta conductividad hidráulica debido al material gravoso.

Las condiciones de conductividad hidráulica analíticas han sido estudiadas a lo largo de los años, en la actualidad esta caracterización del acuífero está casi completada. La distribución espacial del parámetro de la conductividad hidráulica ha sido creada usando métodos de interpolación. Simplificando la complejidad de la caracterización con técnicas geoestadísticas.

La aplicación de métodos geoestadísticos para crear una distribución espacial del parámetro ha sido un proceso costoso debido a que en muchos puntos no existía dato y en otras áreas existían datos muy dispares en cortas distancias. Por lo cual finalmente se aplicó un enfoque más sencillo de carácter agregado para determinar la distribución espacial que se muestra en la figura 2.9

La conductividad hidráulica de la zona decrece desde la zona oeste hacia el este variando desde 200 m/día hasta 2000 m/día para la capa más alta. (URUMOVIĆ & MIHELČIĆ, 2000). (Ver Figure 2.9).



**Figura 2. 9** Mapa de conductividad hidráulica (Fuente: elaboración propia).

Diferentes estudios han dibujado las líneas equipotenciales del acuífero de Zagreb. Los resultados muestran que la principal dirección del flujo o la dirección característica es de oeste hacia suroeste (Figura 2.10).



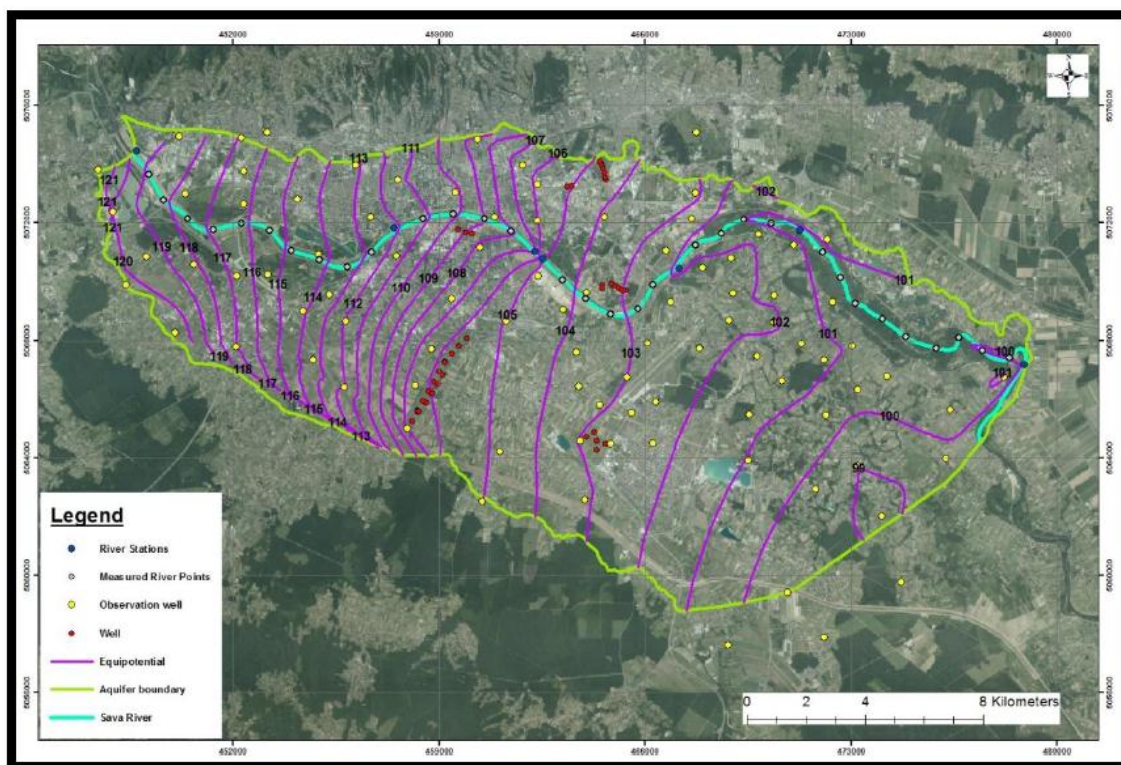


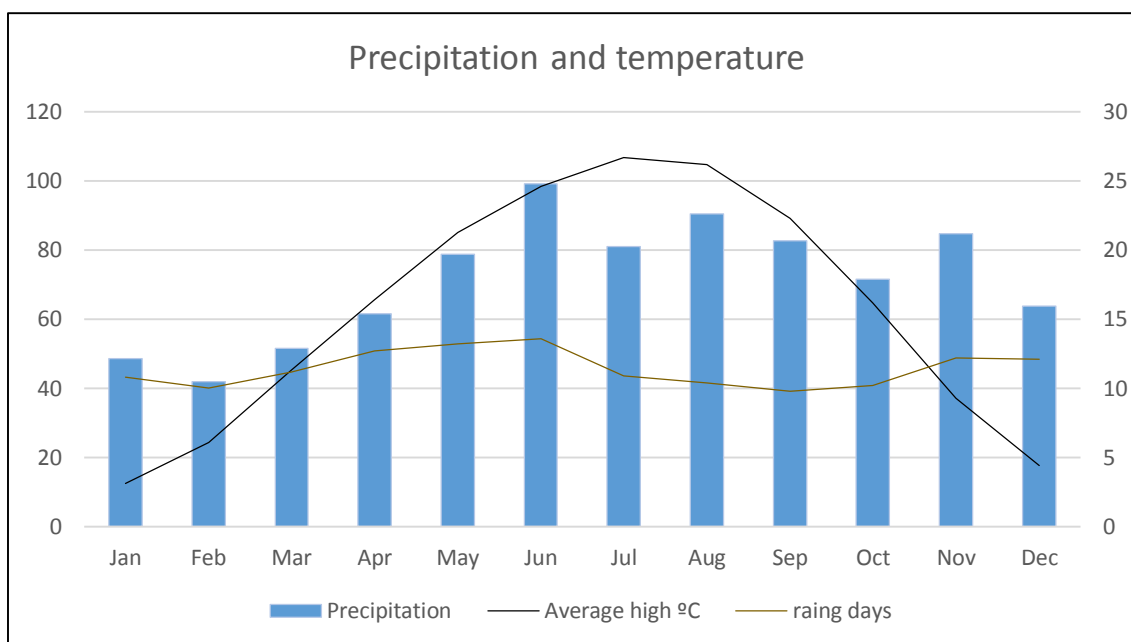
Figura 2. 10 Mapa de líneas equipotenciales (ORAMAS, 2016)

## 2.5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La región de Zagreb se caracteriza por un moderado clima continental (Cfbwx in Köppen climate classification system). Los inviernos son fríos con una media de temperatura de -0.5° C, siendo ésta época del año donde hay más probabilidad alta de nieve. Por el contrario los veranos son calurosos con una media de 20° C. Sin embargo, las precipitaciones y la niebla están presentes durante el otoño. La información climática se recoge en la tabla 2.1

Tabla 2.1. Media la las variables climáticas en Zagreb (Croatian Meteorological and Hydrological Service)

CLIMATE VARIABLE SUMMARY													
Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Record high °C	19.4	22	26	29.4	33.4	37.6	40.4	39.8	32.8	28.3	25.4	22.5	40.4
Average high °C	3.1	6.1	11.3	16.4	21.3	24.6	26.7	26.2	22.3	16.2	9.3	4.4	15.7
Daily mean °C	-0.1	2	6.2	10.9	15.7	19.1	20.8	20	16	10.8	5.7	1.3	10.7
Average low °C	-4	-2.5	0.9	4.9	9.2	12.7	14.2	13.7	10.4	5.8	1.8	-1.9	5.4
Record low °C	-24.3	-27.3	-18.3	-4.4	-1.8	2.5	5.4	3.7	-0.6	-5.6	-13.5	-19.8	-27.5
Precipitation mm	48.6	41.9	51.6	61.5	78.8	99.3	81	90.5	82.7	71.6	84.8	63.8	856.1
Avg. rainy days	10.8	10	11.2	12.7	13.2	13.6	10.9	10.4	9.8	10.2	12.2	12.1	137.1
Avg. snowy days	6	5	4	1	0	0	0	0	0	0	2	5	23
Sunshine hours	59.4	95.7	140.1	175.4	234	243.7	281	256	186.7	130.8	65.6	44.9	1913.3



**Figura 2. 11** Grafico de temperatura y precipitación a lo largo del año (Fuente: elaboración propia)

Del analisis de la gráfica 2.10 se extraen las siguientes conclusiones; las precipitación en el mes de junio es la más alta de todos los meses aunque tiene aproximadamente los mismos días de lluvia que los demas meses. Esto indica que en este mes y los dos siguientes las precipitaciones son de mayor intensidad. Además se concluye que los veranos son húmedos y los inviernos secos (Ver Figura 2.11).

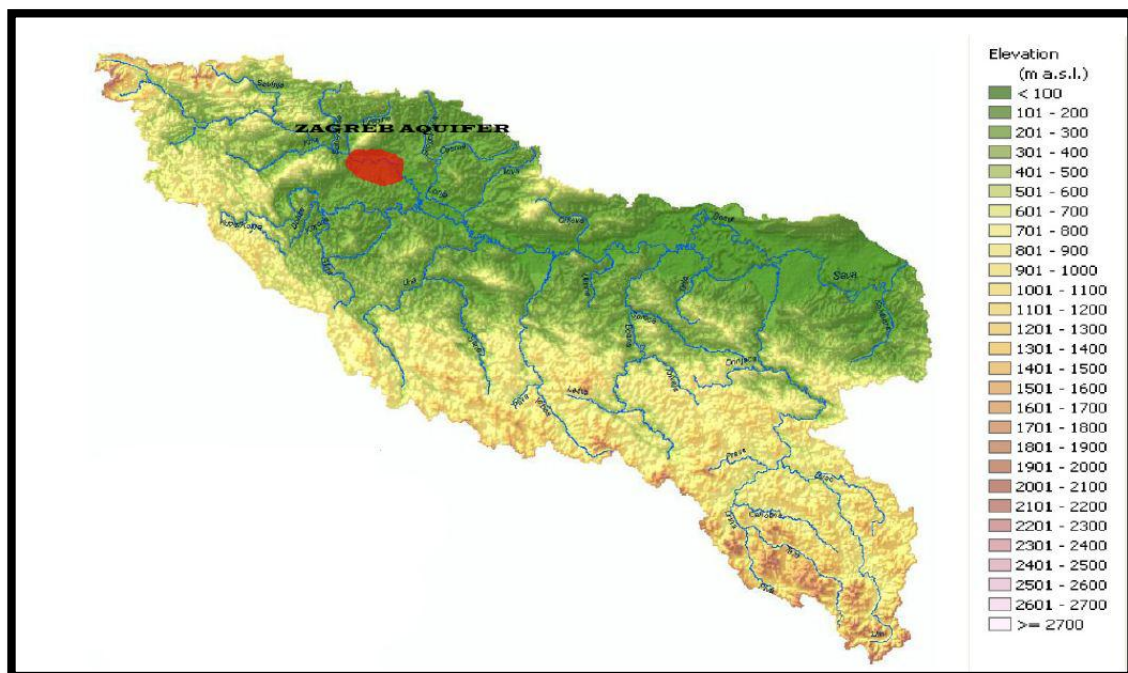
## 2.6. CUENCA DEL RÍO SAVA

### 2.6.1 Descripción de la cuenca.

Es importante conocer la Cuenca del río Sava, sobretodo focalizando el estudio en las sub-cuencas aguas arriba de la localización del acuífero de Zagreb. Conocer también la ausencia de mecanismos de regulación de lo que dispone Croacia. La gestión del agua en esta parte del río es ejecutada por el país vecino de Eslovenia. Además a raíz de este hecho, nace un problema de río transfronterizo que perjudica a la autogestión de los recursos superficiales, subterráneos y al abastecimiento.

La cuenca del río Sava es una sub-cuenca del río Danubio. Está localizada en el sureste de Europ y sus límites de la cuenca engloban a un total de cinco países: Eslovenia, Croacia, Bosnia, Montenegro y Serbia. Estos países han creado la Framework Agreement on the River Basin (ISRBC), esta agencia tiene la responsabilidad de crear y articular programas de gestión conjunta y conservación.

El computo de toda la superficie de la cuenca suma un total de 97.713 km<sup>2</sup>. La silueta de la cuenca dibuja una forma alargada de noroeste hacia sureste, mientras que es delgada en la parte sur y norte. Una característica importante es la cadena montañosa que tiene en la cabecera de la cuenca perteneciente a la república de Eslovenia. En general la cuenca solo tiene montañas altas en esta parte, mientras que en la parte media y baja del río Sava son característica montañas bajas y llanuras donde es típico encontrar regiones de agricultura debido a su gran capacidad para este uso, (Ver capítulo 2.3). También en una de las subcuencas en el sureste, se pueden encontrar montañas de hasta 2500 m.s.n.m que pertenecen a Montenegro y el norte de Albania (Ver Figure 2.11).



**Figura 2. 12** Elevación de la Cuenca del río Sava. Modificada por Miguel Soriano acuerdo a (INTERNATIONAL SAVA RIVER BASIN COMMISSION (ISRBC) at al. 2013).

La cabecera del río Sava está formada por dos arroyos de montaña: el Sava Dolinka (izquierda) y el Sava Bohinjka (derecha) que pertenece a Eslovenia. La dirección del cauce principal del río Sava es de NO-SE atravesando Croacia, formando la frontera con Bosnia y corriendo a través de Serbia en la parte baja de la cuenca donde desemboca en el río Danubio, concretamente en Belgrado. El total del cauce tiene un recorrido total de 945 Km y puede dividirse en tres secciones:

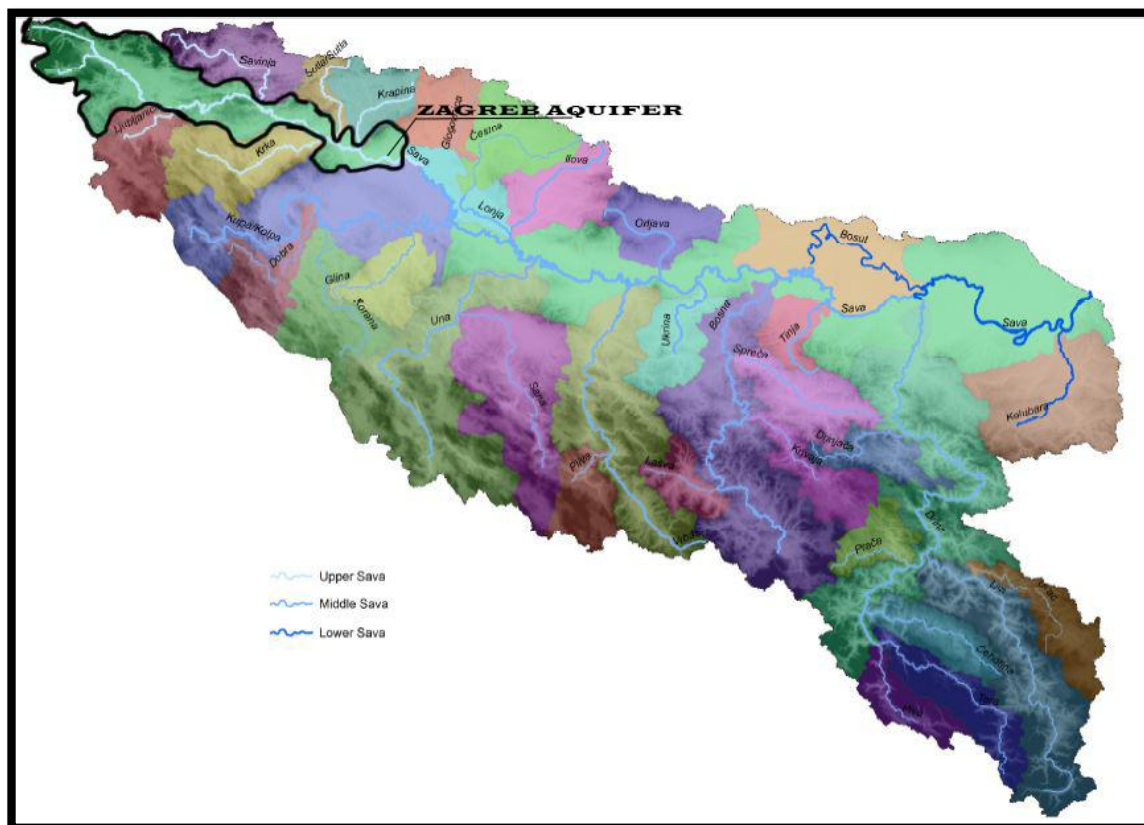
- Tramo alto, entre la confluencia de Sava Dolinka y Sava Bohinjka y Rugvica (km 658). Se trata de la parte montañosa y donde el río adquiere mayor velocidad y fuerza. (Ver figura 2.13).

- Tramo medio, entre Rugvica y la desembocadura del río Drina (Km 178) es la parte de tierras bajas y sobretodo la sección aluvial, que es donde se encuentra el área de estudio. Caracterizada por llanuras de inundación y numerosas sub-cuencas que tributan al cauce principal. (Ver figura 2.13).
- Tramo bajo, aguas abajo de la desembocadura del río Drina, es también de carácter aluvial. No hay tributaciones de sub-cuencas importantes, ya que las importantes se encuentran aguas arriba. Son 100 km de sección hasta la desembocadura en el Danubi (Ver figura 2.13).

**Tabla 2.2 Características básicas de las diferentes secciones del río Sava. (INTERNATIONAL SAVA RIVER BASIN COMMISSION (ISRBC) at al. 2013).**

Section	Upstream basin area A	Specific flow q
	(km <sup>2</sup> )	(l/s·km <sup>2</sup> )
Upper Sava (at Rugvica, km 658)	12,680	31
Middle Sava (at the Drina River mouth, km 178)	86,154	20.1
Lower Sava (at the mouth to the Danube, km 0)	97,713	17.5

La Cuenca del río Sava es muy asimétrica, aproximadamente el 70% del área total es cubierta por otras sub-cuencas y es de donde proviene casi toda la escorrentía generada en la cuenca principal. Se focaliza el estudio del sistema superficial en la sub-cuenca situada en la cabecera del río, cuyo nombre es también Sava y esta subrayada en la figura 2.13. El acuífero de Zagreb está situado en la parte final de esta sub-cuenca. Gran parte de la generación de la escorrentía se produce en las montañas de cabecera y es almacenada en las presas aguas arriba del sistema de Zagreb. Además todas las otras sub-cuencas que rodean el sistema acuífero de Zagreb descargan el agua que recogen aguas abajo del acuífero. Debido a esta condición orográfica y geográfica el caudal del río Sava a su paso por Zagreb es regulado por Eslovenia.



**Figura 2. 13** Sub-cuencas del Rio Sava. Modificada por Modified by Miguel Soriano de acuerdo a (INTERNATIONAL SAVA RIVER BASIN COMMISSION (ISRBC) at al. 2013).

## 2.6.2 Presas y plantas hidroeléctricas.

Siete plantas hidroeléctricas fueron construidas en la parte alta del río Sava en Eslovenia: HPP Moste (1952), HPP Mavčiče (1986), HPP Medvode (1953), HPP Vrhovo (1993), HPP Boštanj (2005), HPP Arto-Blanca (2008), and HPP Krško (2013); y otras dos están planificadas (HPP Brežice and HPP Mokrice) a corto y a largo plazo. Más de una decena están planificadas a largo plazo en la parte de Eslovenia como se muestra en la figura 2.14. Además en la misma imagen se observa que en la actualidad la mayor parte de las presas construidas en el cauce principal de la cuenca se encuentran en la parte de Eslovenia y muy pocas son de gestión. Mientras que en la parte croata las presas actuales son pocas y de generación hidroeléctrica sin capacidad para regular el caudal. En cambio existen varias actuaciones de nuevas presas de generación de energía eléctrica que además podrán ser utilizadas como instrumento de gestión del abastecimiento y riego figura 2.14. Todas estas presas han cambiado el caudal del río Sava a lo largo de los años. Además han modificado el caudal de sedimentos y por lo tanto el fondo del cauce del río debido a los procesos fluviales. Esta erosión del fondo también provoca cambios en la relación río acuífero a su paso por Zagreb en la Figura 2.15 se observa esta disminución del fondo del lecho del río.

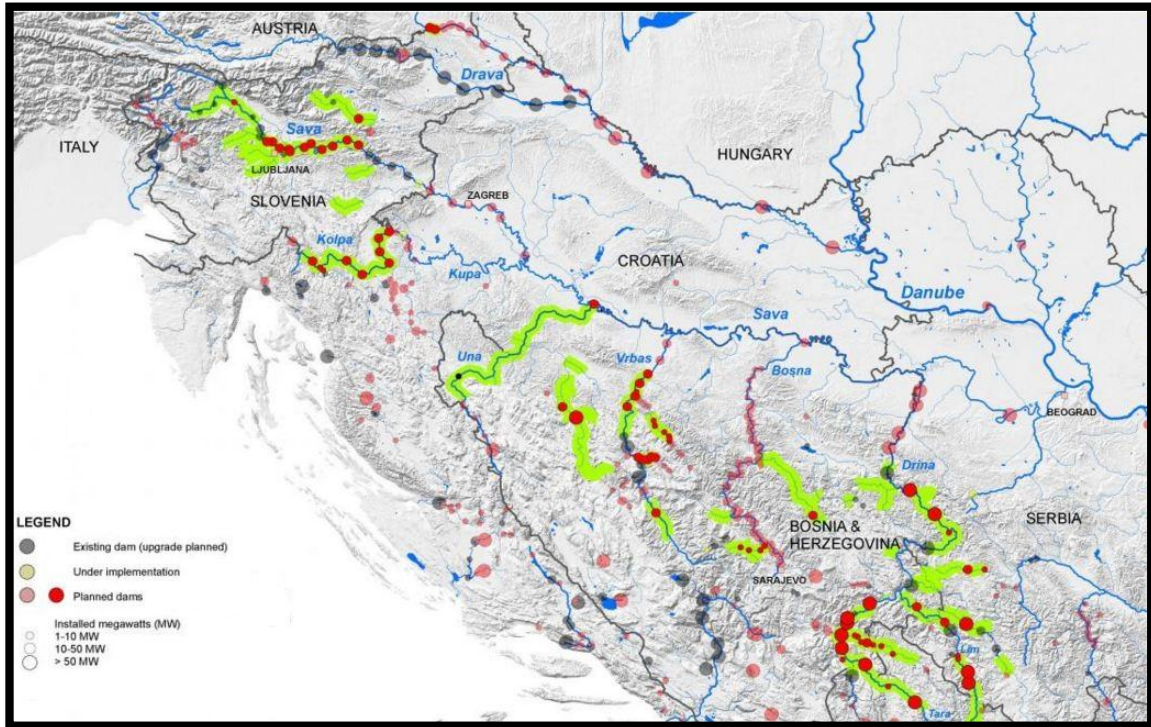


Figura 2. 14 Distribución espacial de la actuales y futuras presas

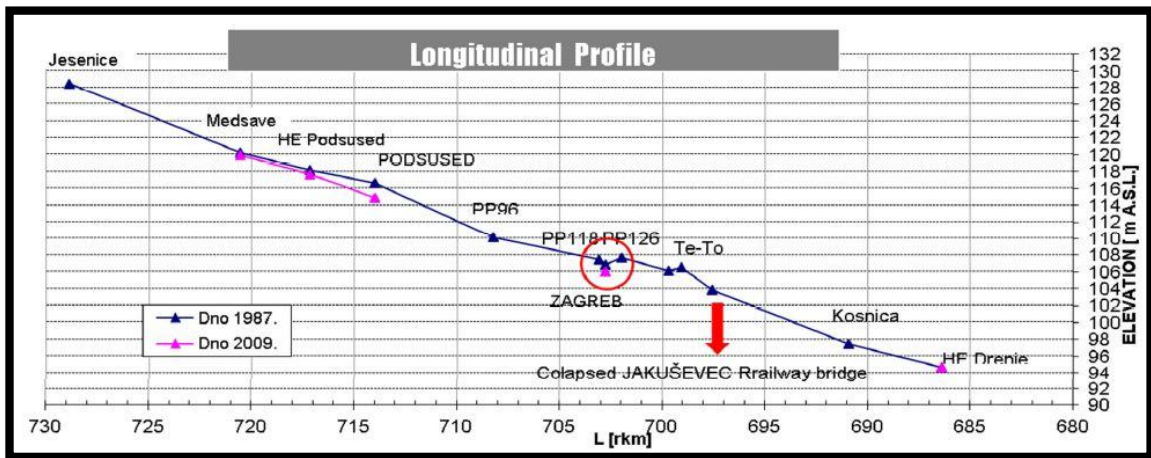


Figura 2. 15 The Sava River longitudinal profile in the reach between river kilometre 685 and km 730 (Oskoruš, 2012).

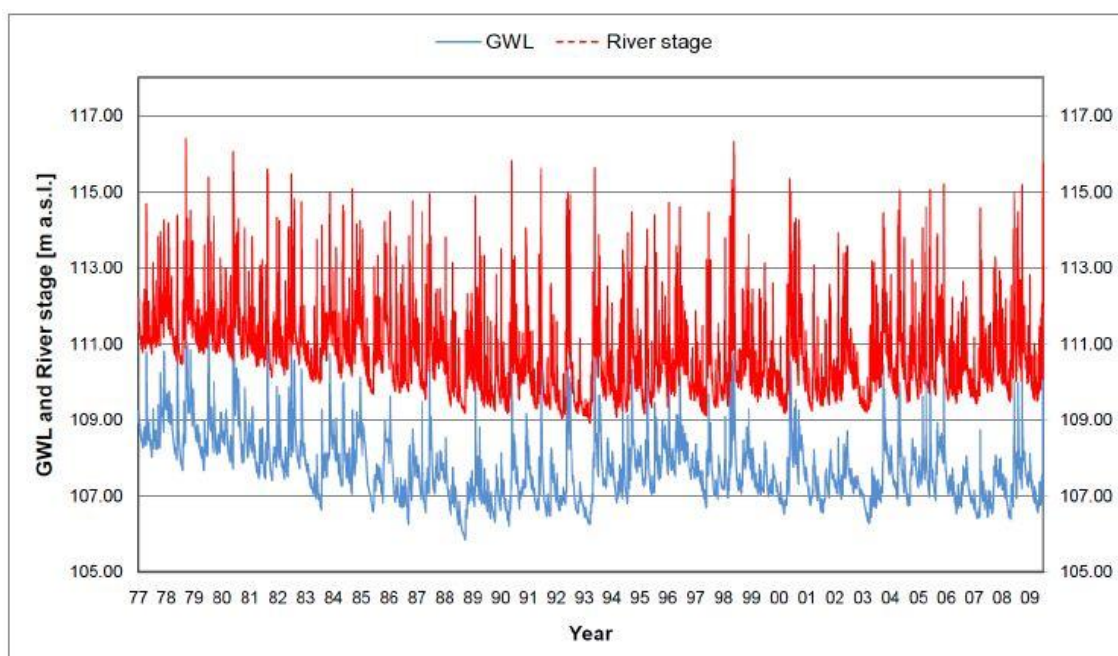
### 3. CONOCIMIENTOS PREVIOS DEL SISTEMA

#### 3.1 EFECTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA TE-TO

El estudio “The influence of the river dam Te-To on the Groundwater levels of Zagreb Aquifer” (Andrea BAČANI , Kristijan POSAVEC , Tatjana VLAHOVIĆ and Sandra TUCAK-ZORIĆ, 2013) que precede a éste, tenía como objetivo mejorar la información sobre cuales serían las modificaciones en los niveles de agua subterrneos probocados por una presa o azud.

Un análisis del los niveles del acuífero desde 1950 (Primeras medidas) indican que los niveles estan en constante decrecimiento desde 1950, con un media de 1-2 metros cada 10 años. A comienzos de 1990 este decrecimiento fue temporalmente detenido debido a la cosntrucción de una presa en el río Sava, cerca de la central termoelectrica en Zagreb, la cual usaba la represa para recoger agua para su refrigeración. Sin embargo, despues de la construcción, la tendencia del decrecimiento continuo con una similar intensidad. La presa para la central termoelectrica tiene por nombre (TE-TO).

Hasta la actualidad se había estudiado las correlación usando los piezómetros cercanos al cauce del río Sava y con una inspección visual (Ver figura 3.1). Nunca se han utilizado herramientas estadísticas como los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman.

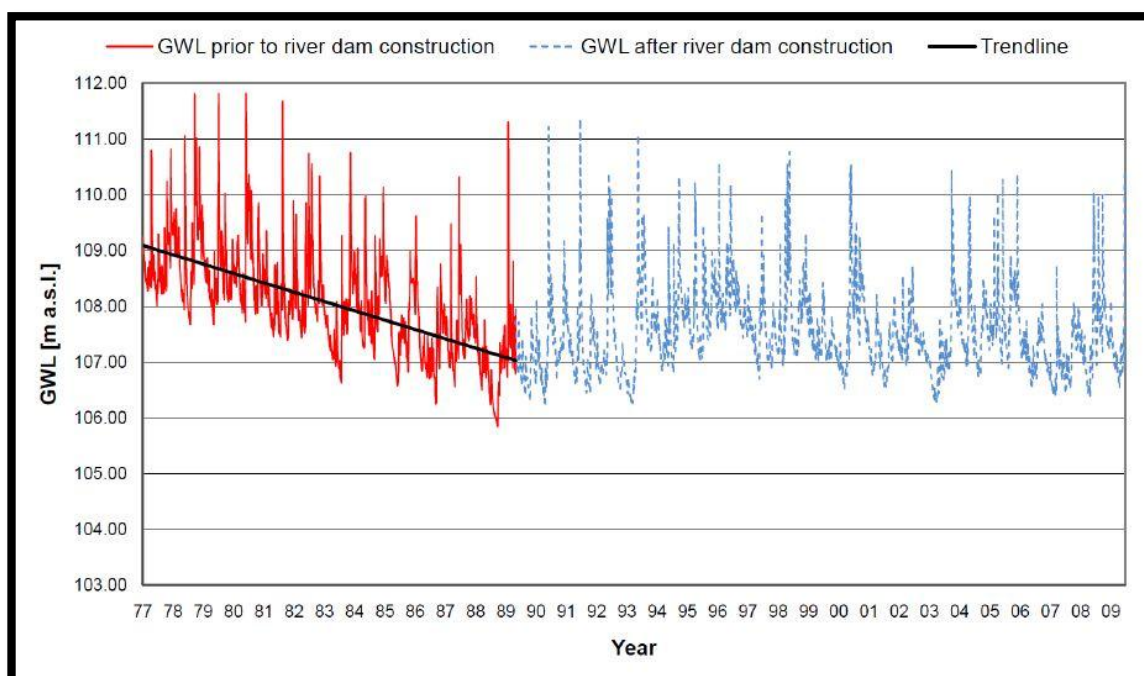


**Figura 3. 1** Comparación de los nivels de agua del río Sava y los nivels de agua del acuífero usando piezómetros en las vecindades del cauce. (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)

La presa del río fue construida para las necesidades de la planta termoeléctrica de Zagreb (TE-TO) debido a que en 1981 los niveles del río Sava estaban disminuyendo y la central necesitaba un caudal constante para su refrigeración. Por ello hubo que garantizar un nivel mínimo constante de 106.75 msnm para no depender de las bombas. Tras varias reparaciones y reformas la presa adquirió su estado actual en 1993.

Con el fin de evaluar la influencia de la presa en los niveles de agua del acuífero de Zagreb, fueron evaluados 325 piezómetros.

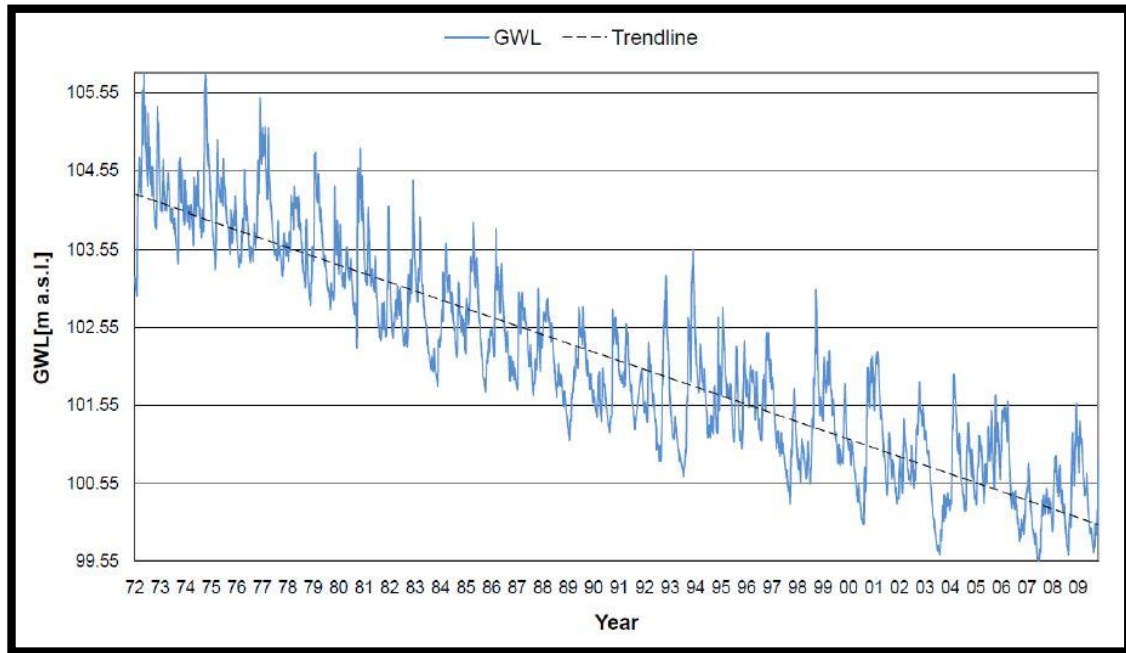
La figura 3.2 muestra el ejemplo del cálculo de la tendencia del nivel freático hasta la construcción de la presa y como se modifica la tendencia tras la construcción de la presa. El piezómetro de control utilizado está en las cercanías de la presa.



**Figura 3. 2** Niveles y tendencia de un piezometro cercano al río antes y tras la construcción del presa TE-TO (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)

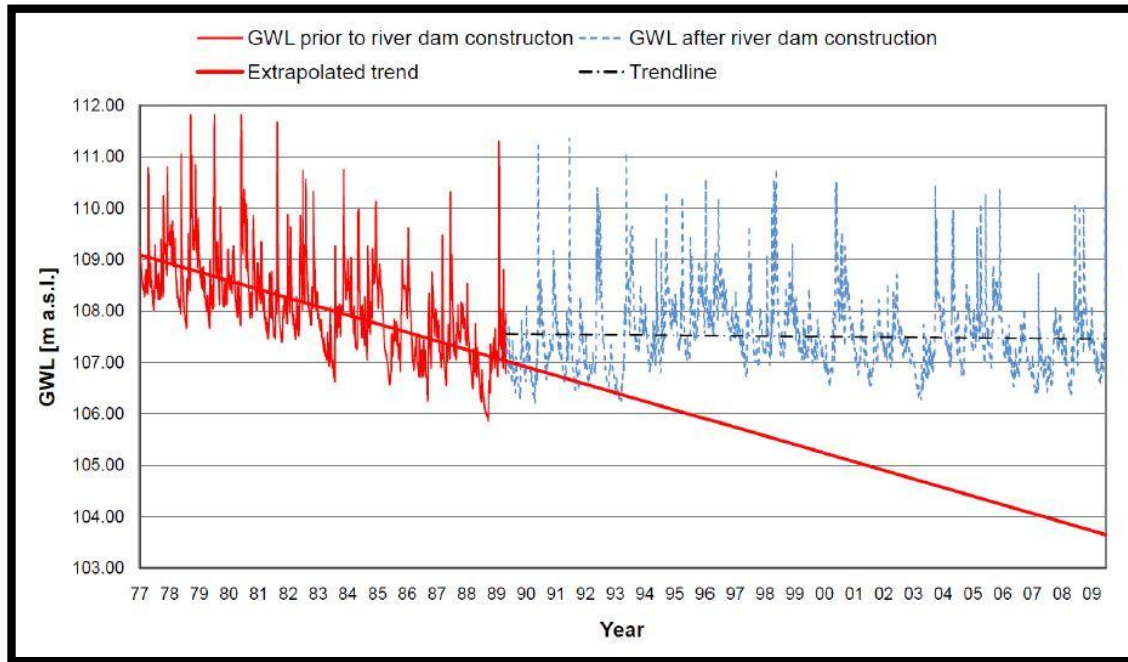
Otra parte del estudio realiza el mismo análisis para un piezómetro más alejado de la presa en la parte aguas arriba de la presa y en el sur-oeste. La figura 3.3 muestra como la presa no ha realizado ningún cambio significativo en la tendencia decreciente del nivel freático.





**Figura 3. 3** Piezómetro situado al suroeste de la presa TE-TO (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)

Con el objetivo de analizar el impacto real en los niveles que produjo la presa se realiza una extrapolación de la tendencia que había antes de la construcción de la presa y de la tendencia o realidad que ha producido la construcción (Ver figura 3.4). Tal comparación se realizó para todos los piezómetros analizados y todos dieron un resultado similar en el área de influencia de la presa. Aunque en la siguiente imagen solo se muestre uno de los resultados.



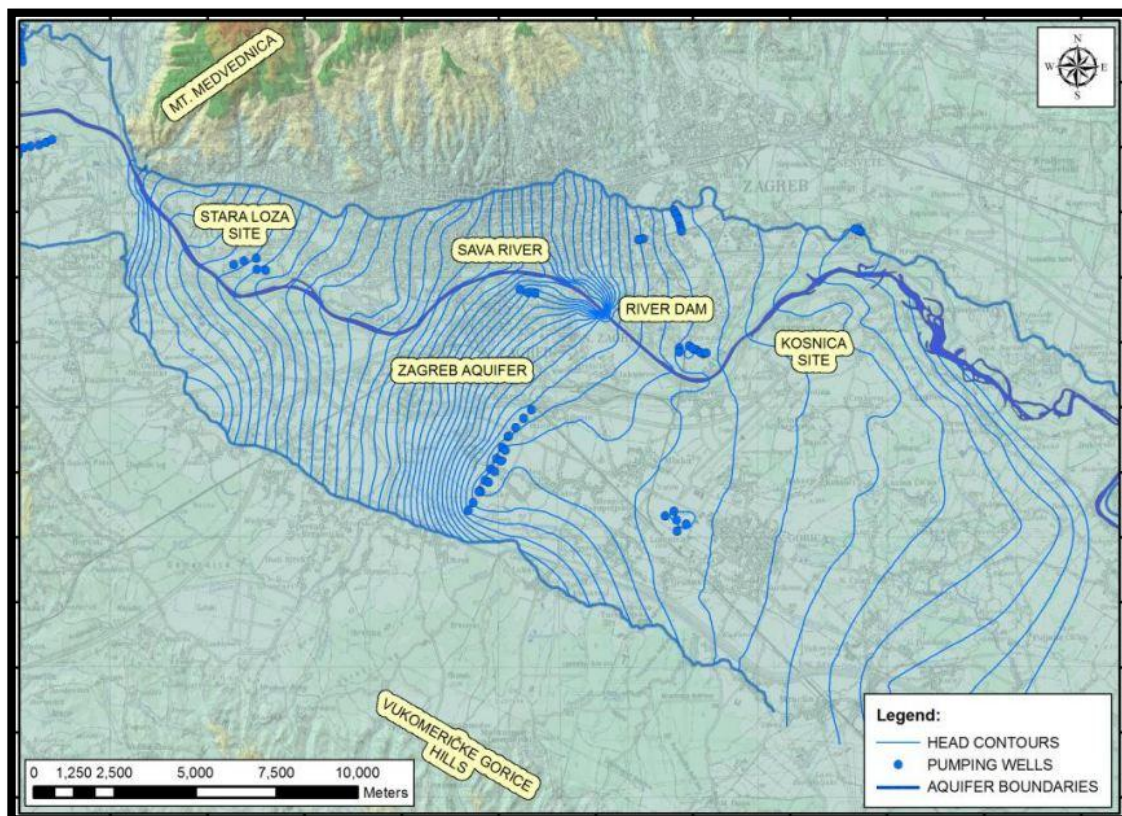
**Figura 3. 4** Diferencia entre el escenario posterior y anterior a la construcción de la presa (Bacani, Posavec, Vlahovic, Tucak-Zoric)

Sobre la base de distintos análisis se puede concluir que la influencia de la presa en los niveles del acuífero es más alta en las zonas del acuífero al oeste con un efecto de estabilización de los niveles del acuífero de 2.3 metros de media. La influencia de la presa del río es más pronunciada en la zona de la orilla izquierda del río Sava se analizará en el siguiente estudio y se prevé sea por la dirección del flujo. La influencia de la presa disminuye significativamente hacia la parte occidental del acuífero.

La tendencia decreciente antes de la construcción de la presa era mucho más marcada en las áreas de los campos de pozos y los estudios muestran que la construcción de la presa modificó la tendencia de una forma más marcada sobre todo en las áreas de los campos de pozos debido a los conos de depresión.

Añadir como resultado de los estudios que el efecto de la presa no aumenta los niveles del acuífero, simplemente modifica la tendencia o la estabiliza. Los resultados indican que incluso pequeñas presas en el río pueden reducir la tendencia negativa en partes estudiadas del acuífero.

La localización de la presa se muestra en la figura 3.5. El río aguas arriba de la presa disminuye 0.4 m/km, mientras que aguas debajo de la presa el descenso es de 6 m/km.



**Figura 3. 5** Localización de la presa y mapa 2 de equipotenciales. Muestra el cambio en la dirección del flujo subterráneo y sobretodo en las vecindades a la presa. (Deliverable D4.2 Version 2.0, 2011, GENESIS).

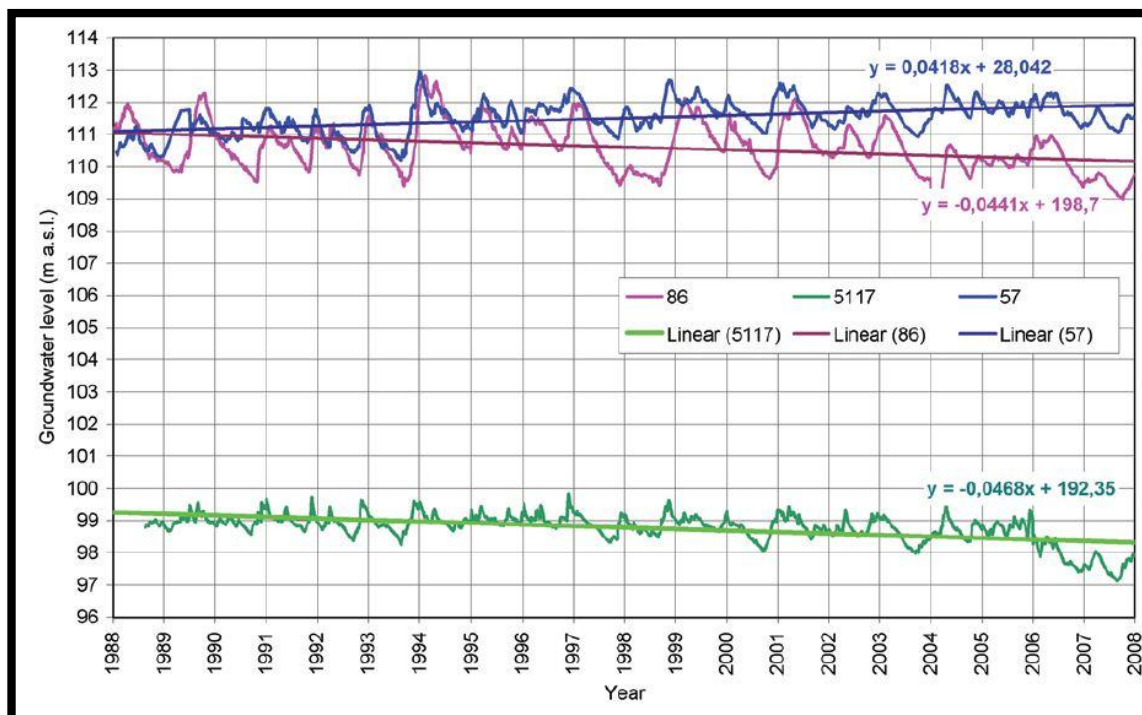
Gracias a la presa Te-To el campo de pozos de Mlaka sigue activo en la actualidad abasteciendo a la ciudad de Zagreb. Puesto que en el caso de que fuera necesario bajar más la punta de la bomba en los pozos, esta queda cerca del acuífero dos el cual debido a sus condiciones geológicas hacer más difícil y cara la extracción.

### 3.2 PROBLEMA DE CANTIDAD, TENDENCIA NEGATIVA DE LOS NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEOS.

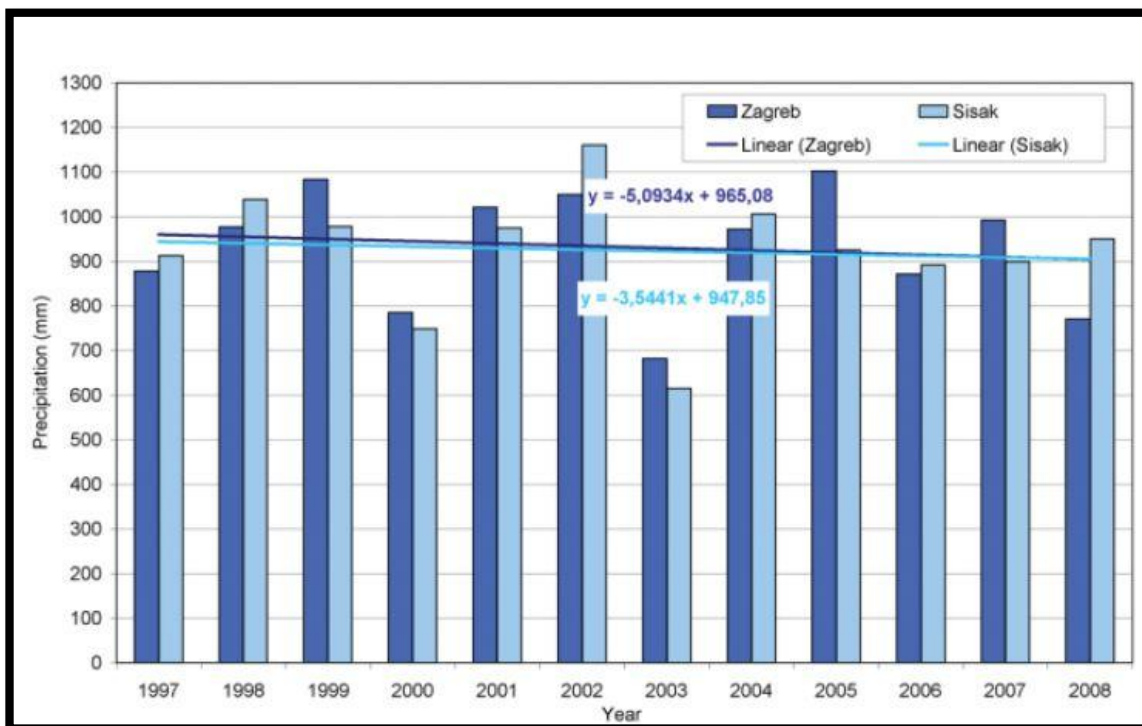
El nivel freático del acuífero en la totalidad de su área ha estado decreciendo desde que se tienen mediciones, 1950. En la figura 3.6 se muestra la medición en forma de serie histórica de tres de los piezómetros que se van a analizar en los próximos capítulos. La medición es a partir de 1988 es decir tras la construcción de la presa TE-TO, se observa que a pesar de la corrección del decrecimiento brusco de los niveles, la tendencia sigue siendo negativa. Diferentes estudios dan las siguientes razones:

1. La erosión del lecho del río producido por la regulación del río Sava en la república de Eslovenia.(POSAVEC,2006)
2. La construcción de dique contra inundaciones, que eran construidos mediante la explotación de las grava del lecho del río Sava. Permitió que estos huecos se rellenaran con grano más fino y cambio la tasa de infiltración y la geomorfología del acuífero-río. (POSAVEC,2006)
3. Decrecimiento de las precipitaciones debido al efecto del cambio climático. (POSAVEC, 2006). (Ver figura 3.7)
4. El incremento de la explotación del acuífero de Zagreb debido al rápido incremento de la población de Zagreb en los últimos años. (POSAVEC,2006)
5. Largos periodos de sequias. (POSAVEC,2006)
6. Excesivo bombeo para la demanda de la industria. (POSAVEC, 2006). Aunque en los últimos años han bajado los bombeos que se destinaban a industria por lo que se han conseguido estabilizar la extracción anual a pesar el crecimiento de la población. Ver figura 3.8)

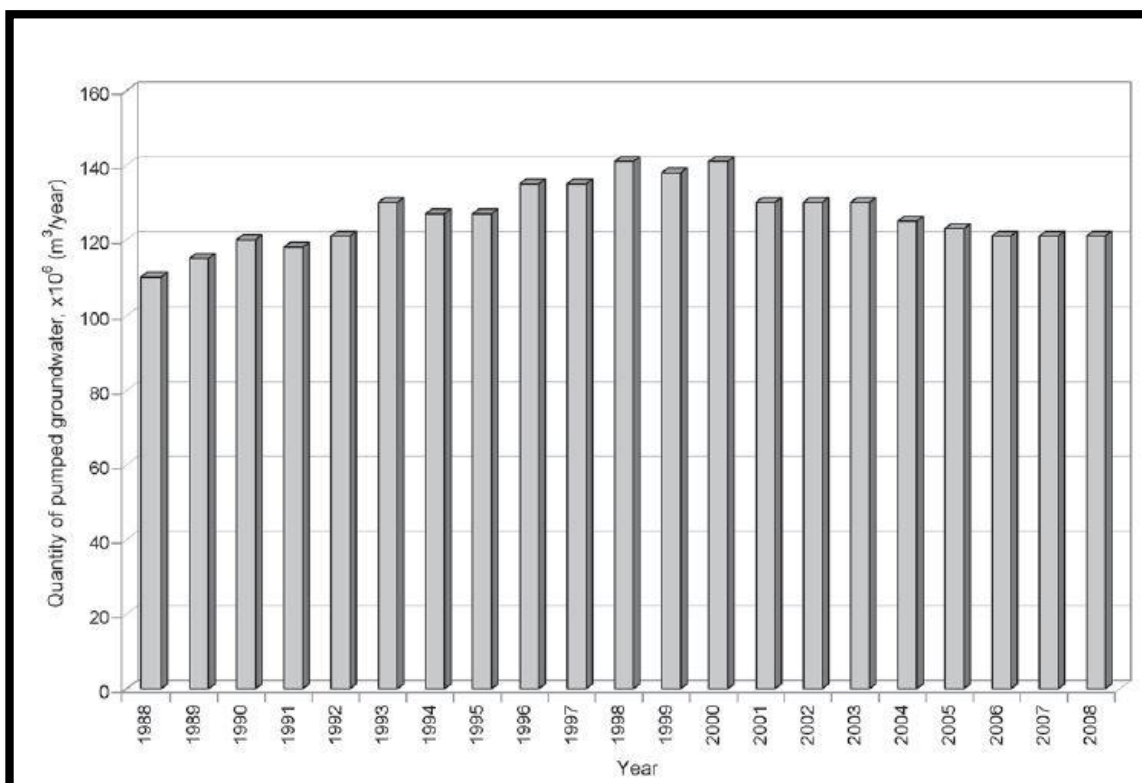
Los niveles de agua ya han alcanzado los mínimos en algunas áreas produciendo que algunos campos de pozos no puedan funcionar en correctas condiciones y por lo tanto causen escasez de agua en algunas áreas.



**Figura 3. 6** Tendencias negativas en diferentes piezómetros (Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, Croatiaal. 2010)



**Figura 3. 7** Serie histórica de precipitaciones desde 1997 (Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, Croatiaal. 2010)



**Figura 3. 8** Serie histórica de extracciones (Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, Croatiaal. 2010)

Diferentes análisis muestran que los niveles de agua en el acuífero descienden 1-2 metro cada 10 años. (Bačani and Posavec, 2009). Debido a la continua tendencia decreciente de los niveles, se ha cuestionado el funcionamiento individual de las estaciones de bombeo. Sobre todo de la estación más importante que es la de Mala Mlaka. Este decrecimiento es de vital importancia para asegurar el abastecimiento a la ciudad en el futuro. Una de las soluciones potenciales es la recarga artificial del acuífero o la construcción de nuevas presas.

## **4. ESTADÍSTICA APLICADA**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En el estudio se va trabajar con herramientas estadísticas y con dos variables principalmente; el nivel freático del agua en el acuífero en diferentes piezómetros y el nivel del agua en el río medido desde el nivel del mar las dos a lo largo de un año.

Se utilizaran las herramientas de regresión lineal y coeficientes de correlación las cuales van a ser descritas en el siguiente capítulo. Ambas herramientas son utilizadas en varios campos de la ciencia para medir si existe asociación entre dos variables, también si se quiere conocer la fuerza de la asociación ( $r^2$ ) o para encontrar una ecuación que describa la relación entre ambas variables o incluso para realizar predicciones.

El concepto de correlación es la medida en la cual se relacionan dos variables diferentes mientras que la regresión es la ecuación matemática que describe el comportamiento de dos medidas. La correlación se torna interesante cuando se necesita saber con qué fuerza influye una variable en el comportamiento de la otra como es el caso de estudio. La regresión es más útil cuando se busca la predicción.

## **4.2. INTRODUCCIÓN A LA REGRESION LINEAL Y LOS COEFICIENTES DE CORELACIÓN**

La correlación y regresión lineal ofrece un abanico amplio de utilidades para analizar pares de variables e expresar la máxima información, las principales utilidades de estas herramientas se describen a continuación:

Uno de los objetivos es analizar si hay algún tipo de asociación entre las dos variables, en otras palabras, como un cambio en la variable “X”, causa un cambio en la variable “Y”, si una de las variables crece la otra también crecerá (o decrecerá). En algunos casos la relación entre dos variables puede ser observada a simple vista superponiendo los gráficos de ambas variables o simplemente porque se conoce que físicamente guardan relación. En estos casos ejecutar para este objetivo los coeficientes de correlación no tiene mucho sentido. Sin embargo en muchos casos esta relación no es apreciable mediante gráficos. En otros casos puede parecer como una dispersión aleatoria de puntos cuando en realidad existe relación.

La segunda meta de este tipo de análisis es estimar la fuerza de la relación entre dos variables, usualmente se expresa mediante  $r$  y los rangos van desde -1 hasta 1 y cuando se utiliza  $r^2$  los rangos van desde 0 hasta 1. Pero también se utilizan para caracterizar la fuerza de la correlación, los coeficientes de correlación como  $r$  Pearson y rho de Spearman.

El último propósito, es determinar la ecuación que define la línea a través de la nube de puntos. La ecuación de la línea es obtenida mediante  $Y=a+bX$ , donde  $Y$  es el valor pronosticado a partir del valor  $X$ .  $a$  es la intersección de  $Y$  (el valor de  $Y$  cuando  $X$  es cero) y  $b$  es la pendiente de la línea. La ecuación puede ser utilizada para predecir valores.

En el siguiente estudio se van a utilizar el primer y segundo objetivo únicamente, como métodos de análisis para obtener más información de la relación entre río-acuífero desagregación espacial.

## **4.3. VARIABLE DEPENDIENTE E INDEPENDIENTE**

Cuando se comprueba la relación causa-efecto, la variable que causa la relación es llamada como variable independiente en el caso de estudio será el nivel río y es dibujado en el eje  $X$ , mientras que el efecto es llamado variable dependiente y se dibuja en el eje  $Y$ . En algunos casos no está claro cuál variable causa el efecto sobre la otra, es decir cuál

es la variable independiente y dependiente. Esto debe ser investigado e incluso buscar otras variables que causen efecto. En el caso de estudio queda claro que la variable independiente es el río, puesto que se ha comprobado que los niveles del acuífero están por debajo de los niveles de la lámina libre en el río. Puede darse el caso de que se tengan dos variables y que ninguna cause efecto en la otra, pero sin embargo estén relacionadas. En este caso es completamente arbitrario la colocación de cada variable en cada eje del gráfico. No importa dónde colocar las variables debido a que los valores de P y los  $r^2$  no están afectadas. Finalmente la solución será la misma de cualquiera de maneras.

En esta investigación la variable independiente es el río nivel del agua y se coloca en el eje X, la variable dependiente es sin embargo el nivel freático y se sitúa en el eje Y.

#### 4.4 REGRESIÓN LINEAL

La regresión lineal o Ordinary least Squeares (OLS), es una herramienta importante en el análisis estadístico de recursos hídricos.

La regresión lineal encuentra la línea que mejor se adapta a la nube de puntos de datos. El “mejor” ajuste se define como la línea que minimiza los cuadrados de las distancias verticales entre los puntos de datos y la línea ajustada. Para un punto de datos con un valor X de X1 y un valor Y de Y1, se calcula la diferencia entre Y1 y X1 (el valor predicho de Y en X1), a continuación, al cuadrado. Esto se desvía al cuadrado se calcula para cada punto de datos, y la suma de éstos se desvía al cuadrado mide el rendimiento de una línea de ajuste a los datos. La línea de regresión es aquella para la cual esta suma de las desviaciones al cuadrado se hace más pequeña.

La ecuación de la línea de regresión lineal está definida por la siguiente expresión:

$$y_i = a + bx_i + \varepsilon_i \quad i=1,2,\dots,n$$

Donde:

- $y_i$  Es la observación de la variable dependiente.
- $x_i$  Es la observación de la variable independiente.
- $a$  Es la intersección.
- $b$  Es la pendiente.
- $\varepsilon_i$  Es la observación del error aleatorio o residual para la observación  $i$  de Y
- $n$  Es el tamaño de la muestra.



El error en torno al modelo  $\epsilon_i$  lineal es una variable aleatoria. Es decir, su magnitud no es controlada por el analista, sino que surge de la variabilidad natural inherente en el sistema.  $\epsilon_i$  tiene una media de cero y una varianza  $\sigma^2$  constante que no depende de  $x$ . Debido a esto último,  $\epsilon_i$  es independiente de  $x_i$ .

Una vez que se sabe  $a$  y  $b$ , puede utilizar esta ecuación para predecir el valor de  $Y$  para un valor dado de  $X$ . Se debe hacer este tipo de predicción dentro de la gama de valores de  $X$  que se encuentra en el conjunto de datos original (interpolación). La predicción de los valores de  $Y$  fuera del rango de valores observados (extrapolación) a veces es interesante, pero puede fácilmente producir resultados insignificantes si se va mucho más allá del rango observado de  $X$ . Esto puede ocurrir fácilmente con la predicción de valores en el acuífero que no tengan ningún sentido por ser muy altos o bajos.

#### 4.4.2 Coeficiente de determinación ( $r^2$ )

El coeficiente de determinación o  $r^2$  está asociado a la regresión lineal, es una medida estadística de la bondad del ajuste o fiabilidad del modelo estimado a los datos. Se representa por  $r^2$  e indica cuál es la proporción de la variación total en la variable dependiente  $Y$ , que es explicada por el modelo de regresión estimado, es decir, mide la capacidad explicativa del modelo estimado.  $R^2$  puede variar entre 0 y 1, valores cercanos a 1. Significan que los valores de  $Y$  caerán prácticamente justo en la línea de regresión y por lo tanto que la estimación será rigurosa o cierta mientras que los valores cercanos a 0 significa que hay poca relación entre  $X$  e  $Y$ , por lo tanto la estimación no será rigurosa.

El coeficiente de determinación no sólo mide la capacidad explicativa de un modelo, sino que además permite elegir entre varios modelos cual es el más adecuado. Así los modelos tienen la misma variable dependiente y el mismo número de variables explicativas, será más adecuado el que tenga un coeficiente de determinación mayor.

El valor  $r^2$  es conocido formalmente como el " coeficiente de determinación ", a pesar de que en general simplemente se denomina  $r^2$ . La raíz cuadrada de  $r^2$ , con signo negativo si la pendiente es negativa, es el coeficiente de correlación de Pearson,  $r$ , o simplemente " coeficiente de correlación". Puede utilizar cualquiera de  $r$  o  $r^2$  para describir la fuerza de la asociación entre dos variables. En la práctica un número reducido de investigaciones prefiere  $r^2$ , aunque depende del campo. Una situación en la que  $r$  es más útil es si se realiza

una regresión / correlación lineal de múltiples conjuntos de muestras, con algunos que tienen pendientes positivas y algunas que tienen pendientes negativas, y desea saber si el coeficiente de correlación media es significativamente diferente de cero (McDonald y Dunn, 2013) para una aplicación de esta idea. No hay una regla general para lo que es demasiado bajo un  $r^2$  para una ecuación de regresión útil.

#### **4.5 COEFICIENTES DE CORRELACIÓN**

Se puede utilizar el coeficiente de determinación para evaluar la fuerza de correlación entre las dos variables de estudio, no obstante se obsta por utilizar herramientas más potentes como se describe a continuación.

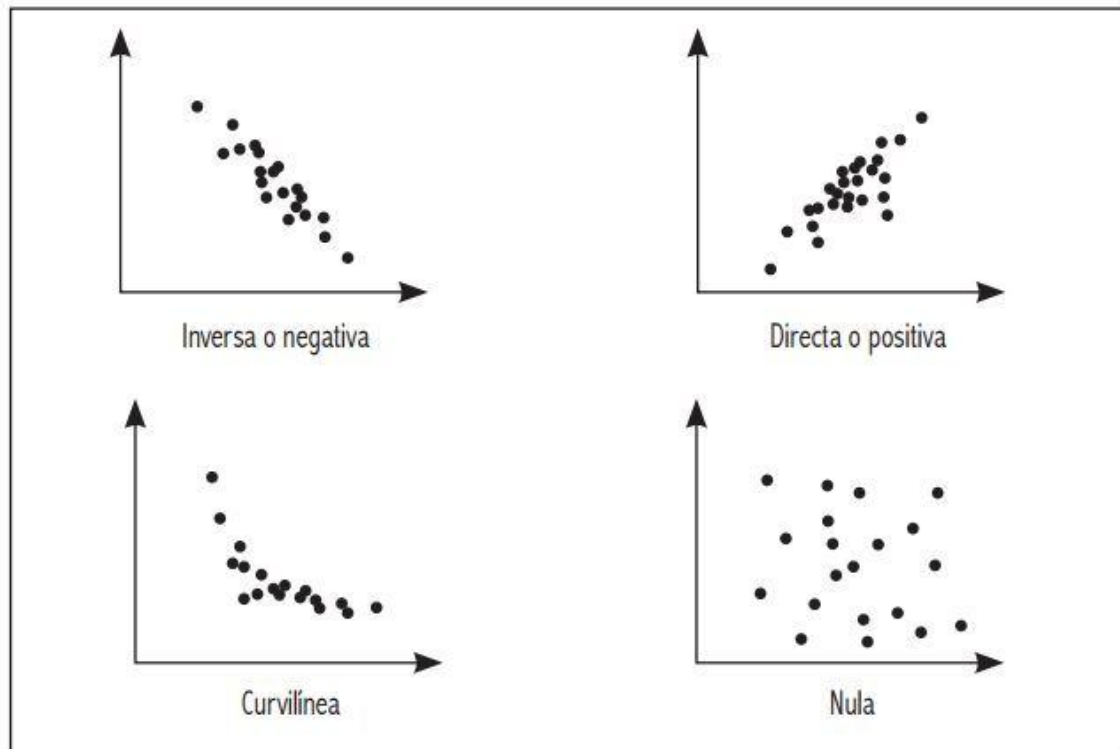
Con los coeficientes de correlación se puede observar si una variable crece cuando la segunda crece también, si una variable decrece cuando la segunda crece o si ambas variables no tienen relación. En la mayoría de casos la correlación no es evidente, puesto que aunque los valores sean bajos, se puede asumir que algún tipo de correlación existe. Una puede causar la otra, como la precipitación causa la escorrentía. También puede existir correlación porque ambas comparten la misma causa, dos solutos medido en una variedad de tiempo o variedad de espacio (Ambos son causados por la variación en la fuente de agua). En estadística nada es causalidad, por ello se ha de conocer muy bien los procesos involucrados, sobretodo en análisis hidrológico.

La medición de la correlación tiene la característica de ser adimensionales, y se ajustan a al rango de  $-1 \leq r \leq 1$ .

Dado que una correlación expresa el grado de asociación entre dos variables, ésta se puede clasificar según el sentido de la relación en (Ver Figura 4.1):

- Lineal o curvilínea, según la nube de puntos se condense en torno a una línea recta o a una curva.
- Positiva o directa, cuando al aumentar una variable aumenta la otra y viceversa.
- Negativa o inversa, cuando al crecer una variable, la otra decrece y viceversa.
- Funcional, si existe una función tal que todos los valores de la nube de puntos la satisfacen.

Cuando no existe ninguna relación y la nube de puntos están distribuidas al azar, se dice que no están correlacionadas (Nula).



**Figura 4. 1** Uso de la correlación de Spearman, (Monica Alejandra Mondraón Barrera, 2014)

#### 4.3.2 Spearman

El coeficiente de correlación de Spearman es un coeficiente no paramétrico, es una alternativa a la regresión lineal o el coeficiente de Pearson-r.

El término estadística no paramétrica hace referencia a los métodos estadísticos que no requieren la especificación de un supuesto sobre la distribución de la que proceden los actos de la muestra para efectuar inferencias sobre la población (Cáceres Hernández, 2006). Es decir, que no exigen la suposición de la normalidad de la población de la cual fue extraída la muestra.

Estos métodos poseen algunas ventajas sobre los paramétricos, por cuanto permiten el análisis de datos que no están basados en una escala de medición muy sólida, por tanto los supuestos requeridos y la escala de medición de los datos es menos exigente, aceptando datos nominales, ordinales, y datos de intervalo o de razón. También se utilizan cuando se desconoce la distribución de la población de la cual se obtiene la muestra. Su mayor desventaja implica el desaprovechamiento de información cuando ésta podría manejarse con un procedimiento paramétrico (Anderson, Sweeney, y Williams, 1999).

Es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos. Éste coeficiente es muy útil cuando el número

de pares de sujetos ( $n$ ) que se desea asociar es pequeño (menor de 30). Es decir funciona mejor que Pearson para conjunto de datos pequeños. Aparte de permitir conocer el grado de asociación entre ambas variables, con Rho de Spearman es posible determinar la dependencia o independencia de dos variables aleatorias (Elorza & Medina Sandoval, 1999).

La metodología para hallar el coeficiente de Spearman es mediante la conversión de ambas mediciones a filas.

La fórmula del coeficiente se expresa como:

$$rho = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Siendo:

$n$  = la cantidad de sujetos que se clasifican

$x_i$  = el rango de sujetos  $i$  con respecto a una variable

$y_i$  = el rango de sujetos  $i$  con respecto a una segunda variable

$d_i = x_i - y_i$

Es decir que  $d_i$ , es la diferencia entre los rangos de  $X$  e  $Y$  (Anderson et al., 1999).

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman puede puntuar desde -1.0 hasta +1.0, y se interpreta así: los valores cercanos a +1.0, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, o sea que a medida que aumenta un rango el otro también aumenta; los valores cercanos a -1.0 señalan que hay una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece. Cuando el valor es 0.0, no hay correlación (Anderson et al., 1999).

La interpretación de los valores se ha expresado por diversos autores en escalas, siendo una de las más utilizadas la que se presenta a continuación (Hernández Sampieri & Fernández Collado, 1998) (Ver figura 4.2):

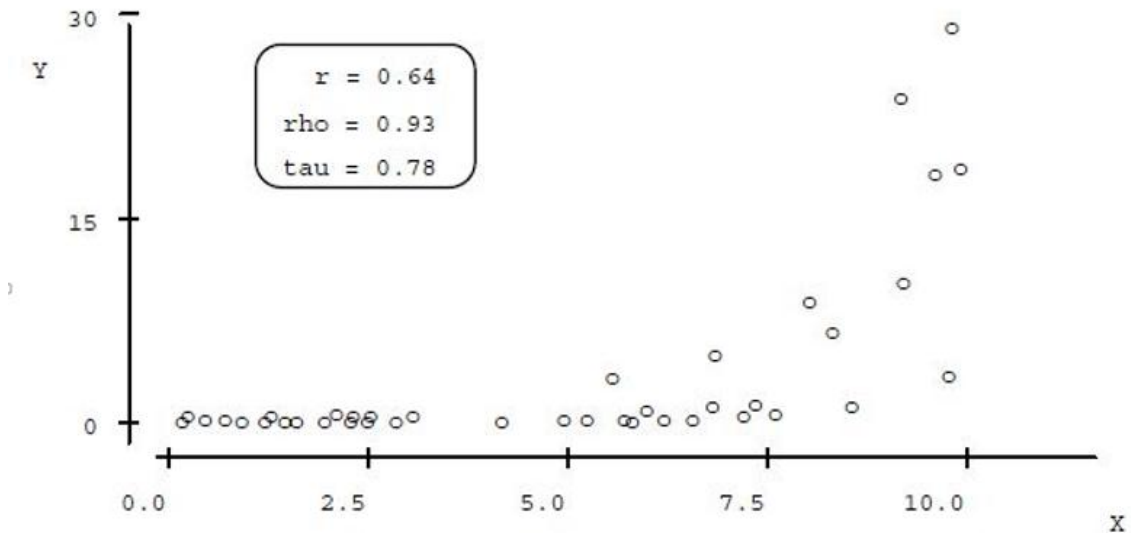
RANGO	RELACIÓN
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0.00	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

**Figura 4. 2** *Uso de la correación de Spearman, (Monica Alejandra Mondraón Barrera 2014 a, basada en Hernández Sampieri Y Fernández Collado, 1998).*

#### 4.3.1 Pearson

Pearson es el más utilizado para la medición de la correlación, el nombre completo es Pearson Product moment Correlation or PPMC. Si los datos se encuentran exactamente a lo largo de una línea recta con pendiente positiva, entonces  $r = 1$ . Esta suposición de linealidad hace aún más importante la inspección de la gráfica para  $r$  que para  $\rho$  porque la no significancia del valor de  $r$  puede deberse a la curvatura o valores atípicos. Como se muestra en la figura 4.3 X e Y pueden estar fuertemente ligados pero de manera no lineal, por lo que mientras el resultado  $r$  puede ser pequeño mientras  $\rho$  puede ser mayor porque no es tan resistente a los valores atípicos.

Se supone que los datos siguen una distribución normal bivariada. Con esta distribución, no sólo las variables individuales  $x$  e  $y$  siguen una distribución normal pues su variación conjunta también sigue un patrón especificado. Este supuesto descarta el uso de  $r$  cuando los datos han aumentado la varianza, como en la figura 4.3 las variables sesgadas muestran valores extremos y aumento de la varianza. Por lo tanto el coeficiente de Pearson a menudo no es útil para describir la correlación entre las variables hidrológicas no transformadas.



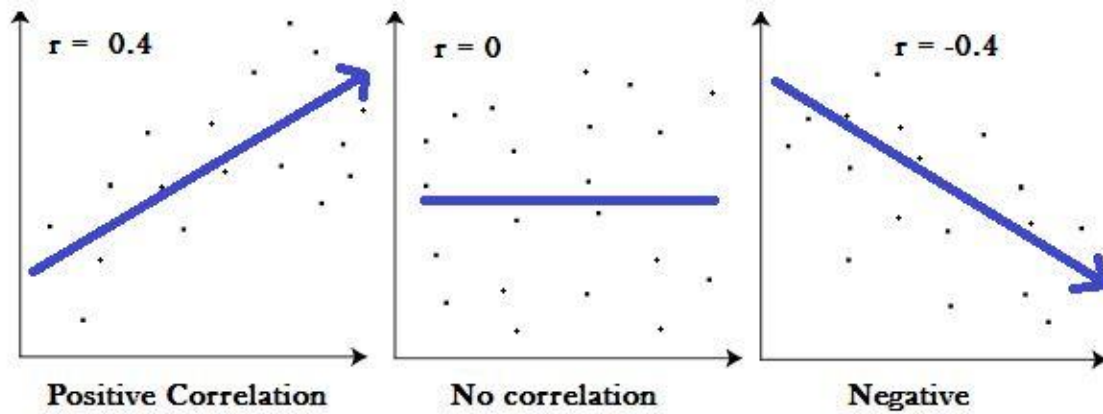
**Figura 4.3** Correlación entre X e Y, no – lineal.

La expresión se conoce como el coeficiente de correlación lineal producto de momentos de Pearson

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum Y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Los resultados pueden ser entre -1 y 1. Hay una pequeña posibilidad de encontrar valores como 0, -1 o 1. Los resultados se contagian de un número en algún lugar entre esos valores. Cuanto más cerca del valor de r se pone a cero, mayor es la variación de los puntos de datos son alrededor de la línea de mejor ajuste.

- Correlación alta:* 0.5 a 1.0 o -0.5 hasta 1.0.
- Correlación media:* 0.3 a 0.5 o -0.3 hasta .5.
- Correlación baja:* .1 to .3 a -0.1 hasta -0.3



#### 4.6 ANÁLISIS DE INFERENCIA ESTADÍSTICA.

La inferencia estadística o estadística inferencial se refiere a un conjunto de métodos mediante los cuales podemos hacer afirmaciones con respecto a una población completa a partir únicamente de la observación de una parte de ella.

Dos formas básicas para realizar inferencia estadística son la estimación y el contraste de hipótesis, también llamado "prueba de hipótesis". Una hipótesis estadística es una afirmación con respecto a una distribución de probabilidad (por ejemplo, podríamos decir que un cierto fenómeno se comporta de forma que puede explicarse por una distribución binomial). En particular, una hipótesis estadística puede ser una afirmación con respecto a un parámetro (si sabemos que la distribución es binomial, entonces podríamos establecer la hipótesis de que la probabilidad de éxito es  $p = 0.5$ ).

Un contraste estadístico de hipótesis es un procedimiento mediante el cual se compara lo propuesto por una hipótesis contra la evidencia empírica que proporciona la observación de datos provenientes de la población sobre la cual se hace la hipótesis. El título que se ha dado a esta discusión tiene que ver con una cuestión básica en el contraste de hipótesis, por la cual podría considerarse que no es muy adecuado el nombre "prueba". Lo anterior, porque este sustantivo podría dar al lector la impresión de que el procedimiento implica certeza, lo cual en estadística desde luego difícilmente se tiene. No obstante a continuación se utilizara el término.

#### 4.6.1 PRUEBA DE HIPÓTESIS.

El coeficiente de correlación  $r$  puede verse como un valor que indica como de bien se ajusta una línea recta en un diagrama de dispersión. El diagrama, sin embargo, no contiene todos los puntos posibles de la población, pues para ello la muestra debería ser igual de grande que la población y casi en la totalidad de casos es imposible. Debido a que  $r$  o  $\rho$  se calculan en base a una muestra aleatoria, por lo cual se espera que los valores de  $r$  o  $\rho$  varíen en función de la muestra elegida. (Tal como la media o la proporción varían de una muestra a otra). Esto plantea la pregunta de la significancia de  $r$ . Puesto de otra manera, ¿cuál es la probabilidad de que la muestra aleatoria de puntos den una correlación fuerte cuando en realidad, los puntos de la población no están correlacionados fuertemente? Es decir haya sido producto del azar.

##### 4.6.1.1 ENFOQUE TRADICIONAL

Se elige la letra griega  $\rho$ , para representar el parámetro poblacional correspondiente a  $r$  o  $\rho$ . Con esto, la significancia de  $r$  será tratada enseguida mediante una prueba de hipótesis del coeficiente de correlación  $\rho$ . Los pasos para la prueba de hipótesis son:

**Paso 1.** Se elige el modelo estadístico apropiado de acuerdo a la figura 4.4.

Cola izquierda	Cola derecha	Dos colas
$H_0 : \rho \geq 0$	$H_0 : \rho \leq 0$	$H_0 : \rho = 0$
$H_1 : \rho < 0$	$H_1 : \rho > 0$	$H_1 : \rho \neq 0$

**Figura 4. 4** Modelos estadísticos para la prueba de hipótesis.

Donde:

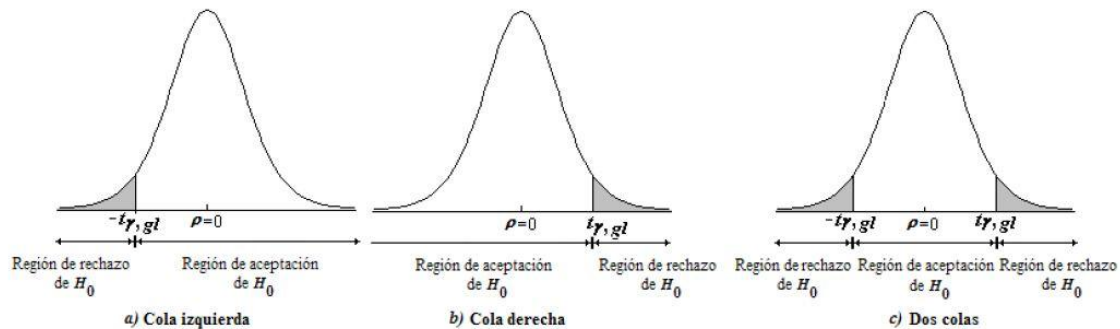
$H_0$ ; es la hipótesis nula que se refiere siempre a un valor especificado del parámetro de población, no a una estadística de muestra. La letra H significa hipótesis y el subíndice cero no hay diferencia. Por lo general hay un "no" en la hipótesis nula que indica que "no hay cambio" Podemos rechazar o aceptar  $H_0$ .

La hipótesis nula es una afirmación que no se rechaza a menos que los datos muestrales proporcionen evidencia convincente de que es falsa. El planteamiento de la hipótesis nula siempre contiene un signo de igualdad con respecto al valor especificado del parámetro.

$H_1$ ; es cualquier hipótesis que difiera de la hipótesis nula. Es una afirmación que se acepta si los datos muestrales proporcionan evidencia suficiente de que la hipótesis nula es falsa.



Se le conoce también como la hipótesis de investigación. El planteamiento de la hipótesis alternativa nunca contiene un signo de igualdad con respecto al valor especificado del parámetro.



**Paso 2.** Elección del estadístico de prueba. En este caso lo proporciona una conversión de la distribución de los valores muestrales  $r$  a una distribución  $t$  de Student mediante su estandarización, siendo el resultado;

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}}, \text{ con } gl = n-2$$

En este paso 2, en resumen, se calcula el valor de  $t$  con los datos muestrales usando la expresión anterior, obteniéndose el valor observado  $t_o$ .

**Paso 3.** Se fija un valor de  $\alpha$  y se calculan los valores críticos de la distribución  $t$  de Student con  $n-2$  grados de libertad. Con esto quedan establecidos los intervalos de rechazo y aceptación de acuerdo al modelo estadístico.

**Paso 4.** Si el valor observado  $t_o$ , cae en la región de rechazo, se rechaza  $H_0$  teniendo una correlación lineal. Si por el contrario, el valor observado  $t_o$  cae en la región de aceptación, se acepta  $H_0$  y no hay una correlación lineal.

#### 4.6.1.2 ENFOQUE DEL VALOR-P

Para este enfoque se utiliza el valor  $p$  que acompaña a  $r$  o  $\rho$  de una forma práctica para ayudar a tomar una decisión; esto es, comparándola con  $\alpha$  de acuerdo a:

Si el valor  $p \leq \alpha$ , rechazar  $H_0$

Si valor  $p > \alpha$ , aceptar  $H_0$

El valor  $\alpha$  suele tomarse como 0.05, por lo tanto cuando el valor  $p$  es menor que 0.05 se puede concluir que la correlación es significativa lo que indica una correlación real y no a la azar.

En el presente estudio se utilizara la prueba de hipótesis con enfoque de valor de P por ser más rápida para programar e utilizar en tantas iteraciones.

## **5. HERRAMIENTAS DE INTERPOLACIÓN**

Para poder mostrar los resultados de una forma limpia, ordenada y con la máxima información espacial de la forma más sencilla. Se obsta por utilizar instrumentos de interpolación. De tal forma que se pueda construir una imagen con un resultado lineal de las zonas del acuífero con mayor y menos grado de correlación. Para ello se utilizan herramientas de Sistemas de Información Geográfica, concretamente Arcgis. El programa cuenta con una amplia gama de herramientas para realizar la interpolación las cuales se exponen a continuación:

### **5.1 IDW**

La herramienta IDW (Ponderación de distancia inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio.

### **5.2 Kriging**

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores  $z$ . Más aún que con otros métodos de interpolación, se debe realizar una investigación profunda del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores  $z$  antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida.

### **5.3 Vecino natural**

La interpolación de Vecino natural halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas

proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981). También se conoce como interpolación de Sibson o de "robo de área".

#### **5.4 Spline**

La herramienta Spline utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.

### **6. DATOS**

En la primera parte de la tesis se analiza y resumen las características principales del sistema, la localización y relación de las diferentes masas de agua y los principales problemas a futuro. Además se describen las herramientas estadísticas a utilizar y sus características. Esta segunda parte del estudio contiene la parte más analítica. En este capítulo en concreto se analizan los datos de los que se ha dispuesto para trabajar. Debido a las condiciones sociopolíticas del país de Croacia el acceso a la información es sesgado por lo que se trabaja con la información de la cual se dispone.

#### **6.1 DATOS DE LOS NIVELES DE AGUA EN EL RÍO**

Se dispone de información diaria de 6 puntos de control localizados en el río. Que dan información del nivel de agua sobre el nivel del mar en el cauce del río Sava. La serie

histórica de cada punto contiene 365 datos pertenecientes a cada día del año 2013. (Ver figura 6.2).

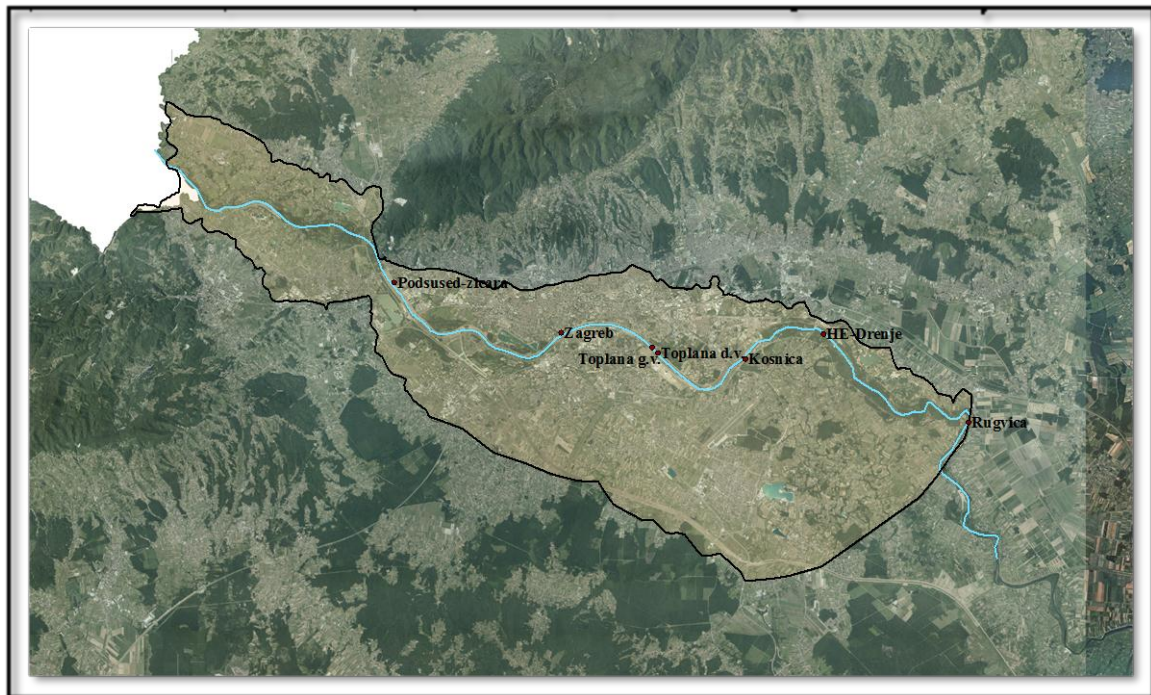


Figura 6. 1 Puntos de control del río (Soriano, 2016)

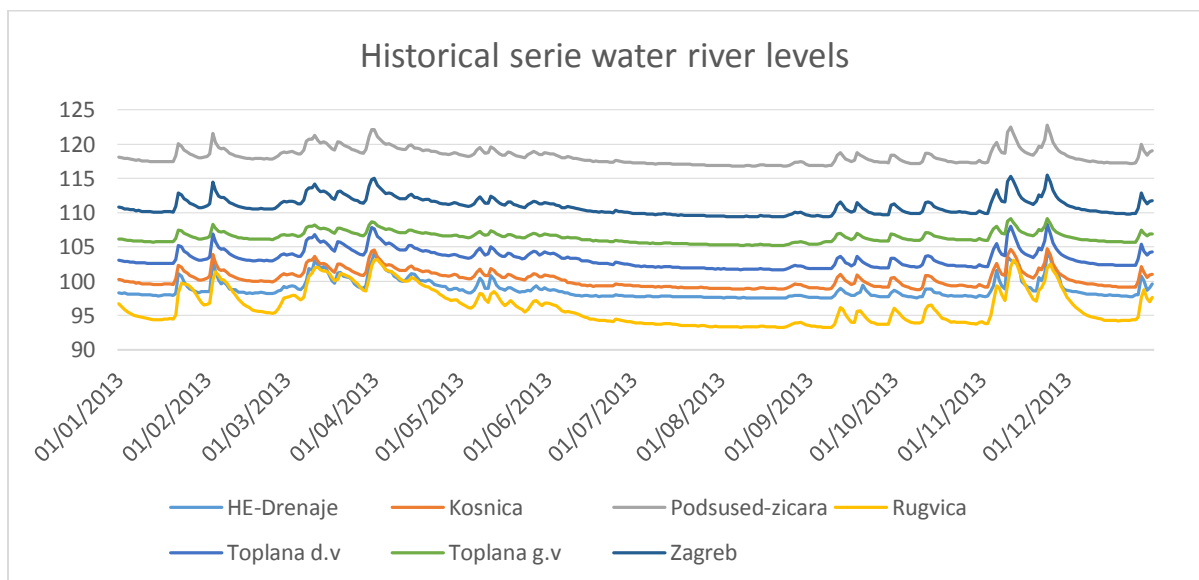


Figura 6. 2 Series históricas del río 2013 (fuente: elaboración propia)

## 6.2 DATOS DE LOS NIVELES DE AGUA EN EL ACUÍFERO

La ciudad de Zagreb y sus alrededores tiene montado un Sistema amplio de monitoreo de los niveles de agua en el acuífero. Es por ello que cuenta con 286 puntos de control del nivel de agua subterránea (Piezómetros). Se dispone de información de la geolocalización de cada punto con su respectiva información de los niveles de agua del año 2013. (Ver figura 6.3). Cada punto representa un piezómetro con medición en los días martes y jueves de cada semana, con la excepción de que algunos piezómetros han medido los días miércoles y viernes. Esto representa un problema para realizar la correlación con los datos del río. Se debe buscar los días de medición de cada piezómetro y elegir esos mismos días en las estaciones de aforo para lograr hacer una correcta correlación. Para ellos se ha utilizado la función “BUSCARV”.

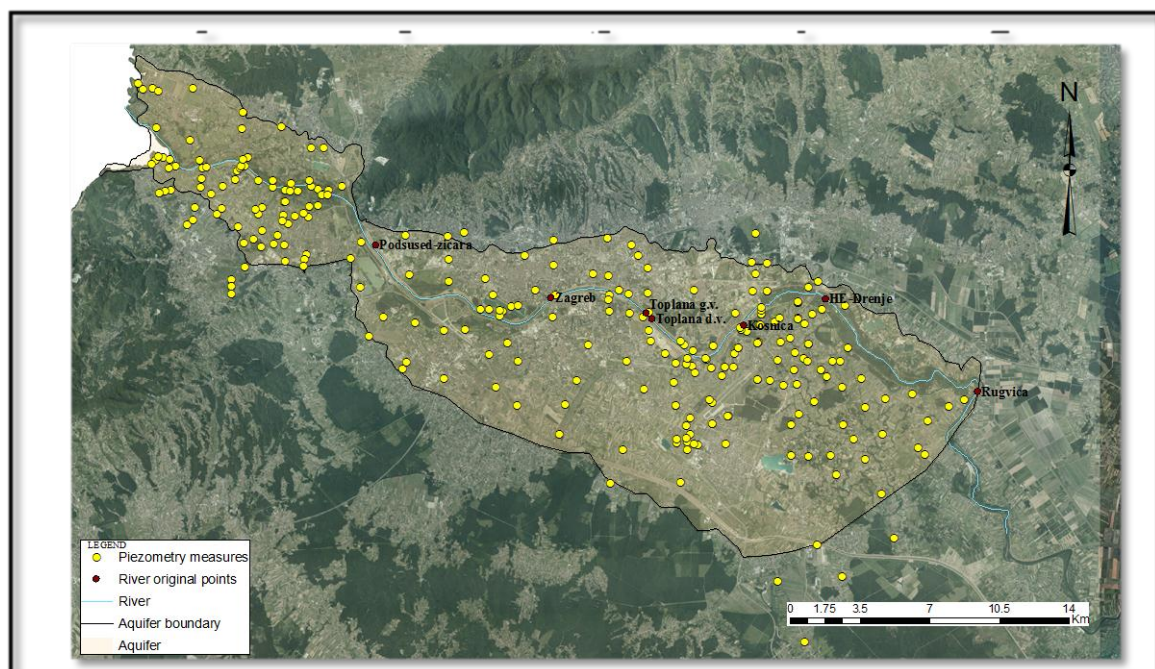


Figura 6.3 Todos los piezómetros de control (fuente: elaboración propia)

## 6.3 OTROS DATOS

- Una ortofoto de Croacia. Del servido WMS Državne geodetske uprave RH.
- Capa formato Shape de los delimitaciones del acuífero georreferenciadas.

## **7. ANALISIS Y TRANSFORMACIÓN DE DATOS.**

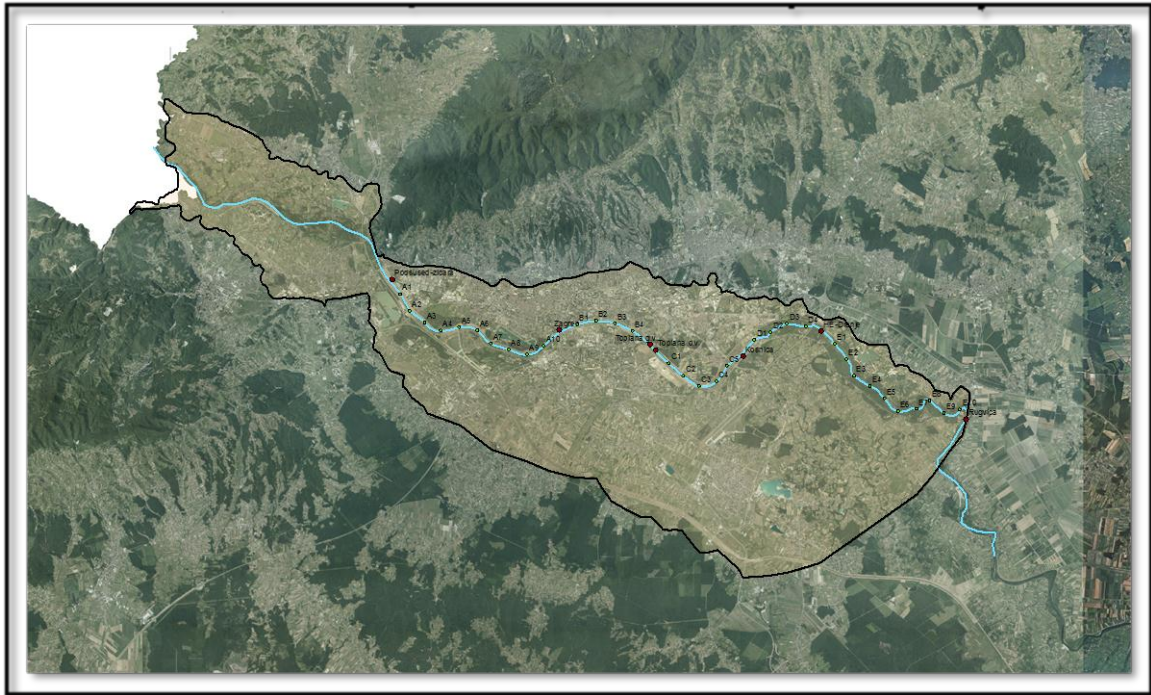
### **7.1 INTERPOLACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL DEL RÍO.**

Nace la necesidad de interpolar los puntos de control en el río para tener más puntos de información a lo largo de todo el cauce de estudio. Es necesario saber la cota en cada tramo del río para compararla con la cota de los piezómetros cercanos al río y así determinar si la lámina de agua está por debajo. Por tanto afirmar o rechazar la hipótesis de que se está produciendo una cesión de agua al acuífero o que existe la posibilidad de efecto ducha. Finalmente se obtienen una totalidad de 42 puntos de control. (Ver figura 7.1)

El método para ampliar el número de puntos de control es mediante una interpolación lineal.

En la ejecución de la correlación cada piezómetro se correlaciona con su punto de control más cercano en el río. No obstante esto no es necesario e incluso todos los piezómetros se podrían correlacionar únicamente con un punto de control. Esto es porque las herramientas de correlación miden los cambios en la tendencia de la gráfica en una línea temporal y como esto afecta a la otra variable. Como el tramo de análisis tiene 64

kilómetros y no hay entradas y salidas de agua significativas a lo largo del tramo. Los cambios en los niveles de agua son similares en el primer punto de control y en el último.



**Figura 7. 1** *Puntos finales de control en el río (fuente: elaboración propia)*

## 7.2 SELECCIÓN DE LOS PIEZOMETROS PARA EL ESTUDIO.

La nube inicial de puntos contiene un total de 286. Para hacer su manejo más ligero se realiza una selección o cluster. La técnica utilizada ha tenido en cuenta los siguientes factores:

- Selección de un único piezómetro por cada 500 metros cuadrados.
- Distribución especial homogénea de la muestra. Para tener la máxima representación posible y que los resultados den la máxima información espacial.
- Selección de puntos en los límites del acuífero para tener la mayor cobertura espacial posible y poder realizar una correcta interpolación y conseguir unos mapas que muestren información suficiente.
- Pintar líneas perpendiculares al perfil longitudinal del río, para tener información de secciones completas a lo largo del acuífero y comprobar la evolución de la correlación conforme me alejo del acuífero (Ver figura 7.1).
- La parte oriental del acuífero se encuentra influenciada por dos secciones del río KOSNIKA- HEDRENJE HEDRENJE - Rugvica área. Es por ello que para un análisis más detallado se selecciona una mayor densidad de puntos.

El resultado de la selección se muestra en figura 7.2 o anejo 1.

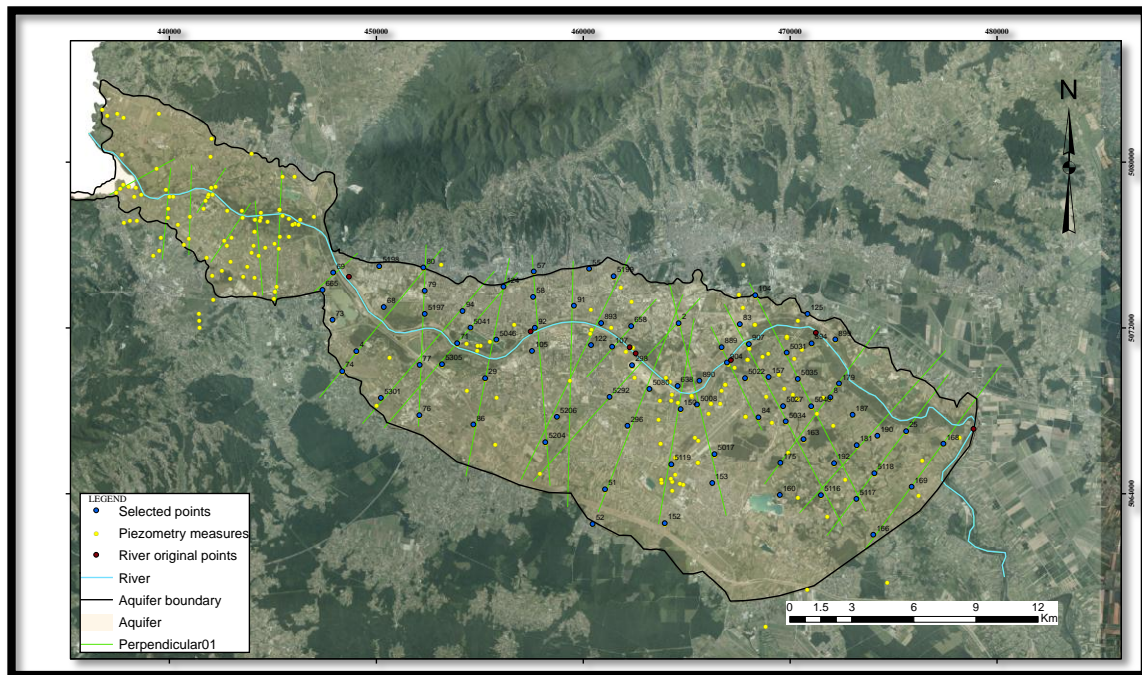


Figura 7. 2 7.2 Puntos seleccionados (Soriano, 2016)



### **7.3 ANÁLISIS DEL TIPO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS VARIABLES.**

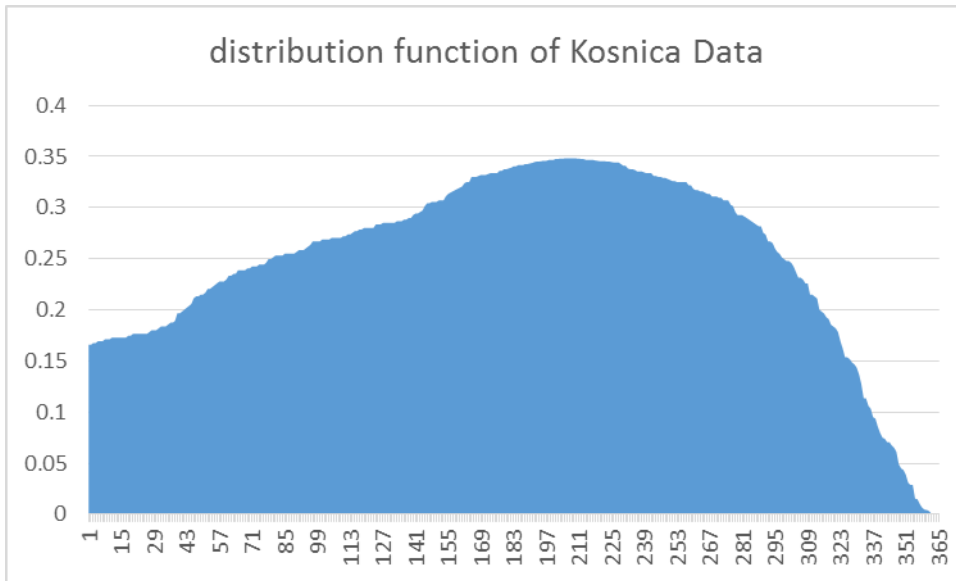
Como ya se ha expuesto en capítulos anteriores para la confección del estudio se utilizan principalmente dos coeficientes de correlación Pearson y Spearman. Según la teoría Pearson solo puede ser usado para distribución de datos que siguen una curva gaussiana o normal. Las principales características de una distribución normal se detallan a continuación:

- La curva normal tiene forma de campana y un solo pico en el centro de la distribución. De esta manera, la media aritmética, la mediana y la moda de la distribución son iguales y se localizan en el pico. Así, la mitad del área bajo la curva se encuentra a la derecha de este punto central y la otra mitad está a la izquierda de dicho punto.
- La distribución de probabilidad normal simétrica alrededor de su media.
- La curva normal desciende suavemente en ambas direcciones a partir del valor central. Es asintótica, lo que indica que la curva se acerca cada vez más al eje X pero jamás llega a tocarlo. Es decir, las “colas” de la curva se extienden de manera indefinida en ambas direcciones.

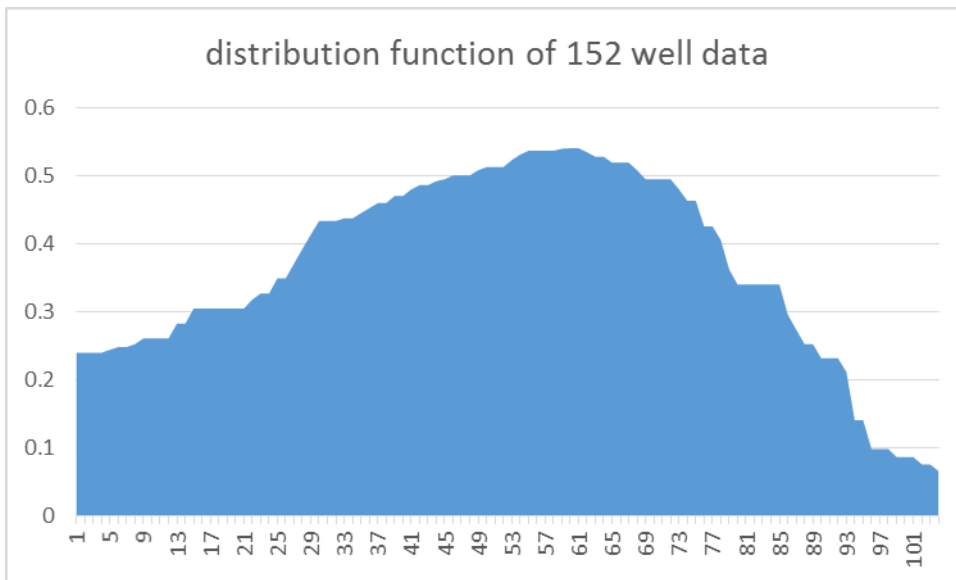
Las características descritas anteriormente son para una función de densidad gaussiana perfecta, como se muestra en la figura 5.3 5.4 y 5.5. La distribución que adquieren los datos queda lejos de estas características, por lo que tras la revisión de la gráfica rechazamos la hipótesis de normalidad y se descarta la ejecución de pruebas paramétricas de normalidad.

Para el análisis se evalúa:

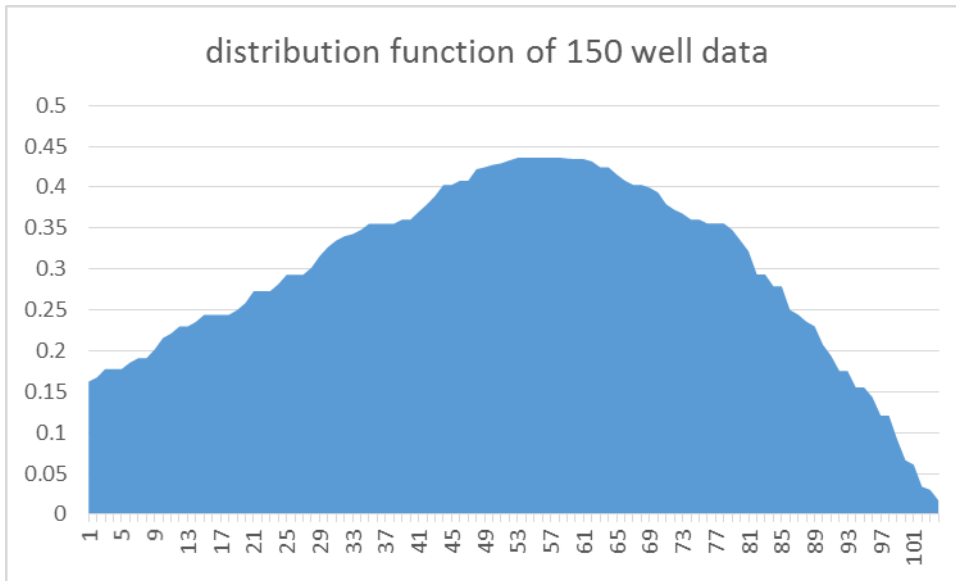
- Un punto de información río. Figura 7.3
- Un punto de información del acuífero cercano al río. Figura 7.4
- Un punto de información del acuífero lejano al río. Figura 7.5



**Figura 7. 3** Función de densidad de probabilidad del variable nivel en el rio con la estación Kosnica (fuente, elaboración propia).



**Figura 7. 4** función de densidad de probabilidad de la variable nivel en el piezómetro 157 (fuente: elaboración propia).



**Figura 7. 5** función de distribución de la variable nivel en el piezómetro 150 (fuente: elaboración propia)

## 8. SELECCIÓN DE LOS PERIODOS DE ANÁLISIS

Tras la revisión de una serie histórica larga de los niveles de agua en los últimos 3 años en varios piezómetros, se concluye que el mejor periodo para el análisis es 2013. Analizando la serie histórica que se muestra en la figura 8.1 se desprende que en el periodo de 2012 los niveles en el acuífero fueron estables. Pero en 2013 algo provocó la subida y bajada intermitente en los niveles del acuífero a lo largo del año. Nace la suposición de que este hecho es debido a la regulación de Eslovenia en esta etapa. Para

obtener mejores resultados en el análisis de correlación es mejor que haya cambios pronunciados en las dos variables a utilizar.

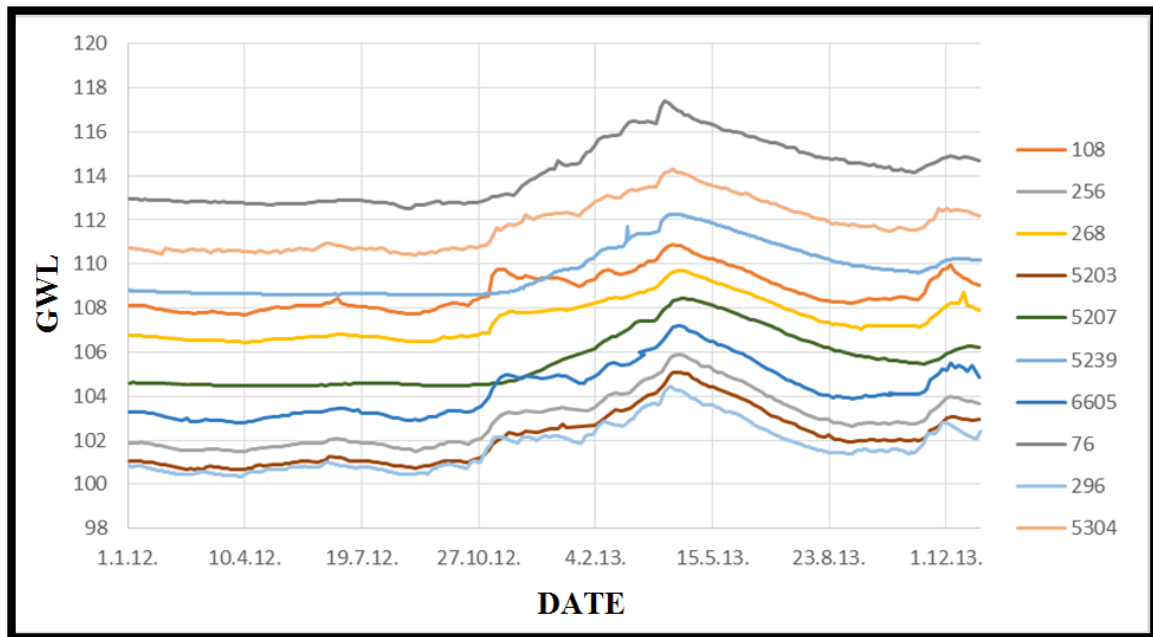


Figura 8. 1 Serie historia del nivel freatico 2012 y 2013(Hruš, 2015)

## 8.2 PERIODOS

Para la realización de un estudio en profundidad de la relación río-acuífero, es necesario conocer si la correlación es la misma en las diferentes estaciones del año o si la correlación es alterada en función de la época del año. Es por ello que se divide la serie histórica en diferentes secciones.

### 8.2.1 PRIMERA ITERACIÓN

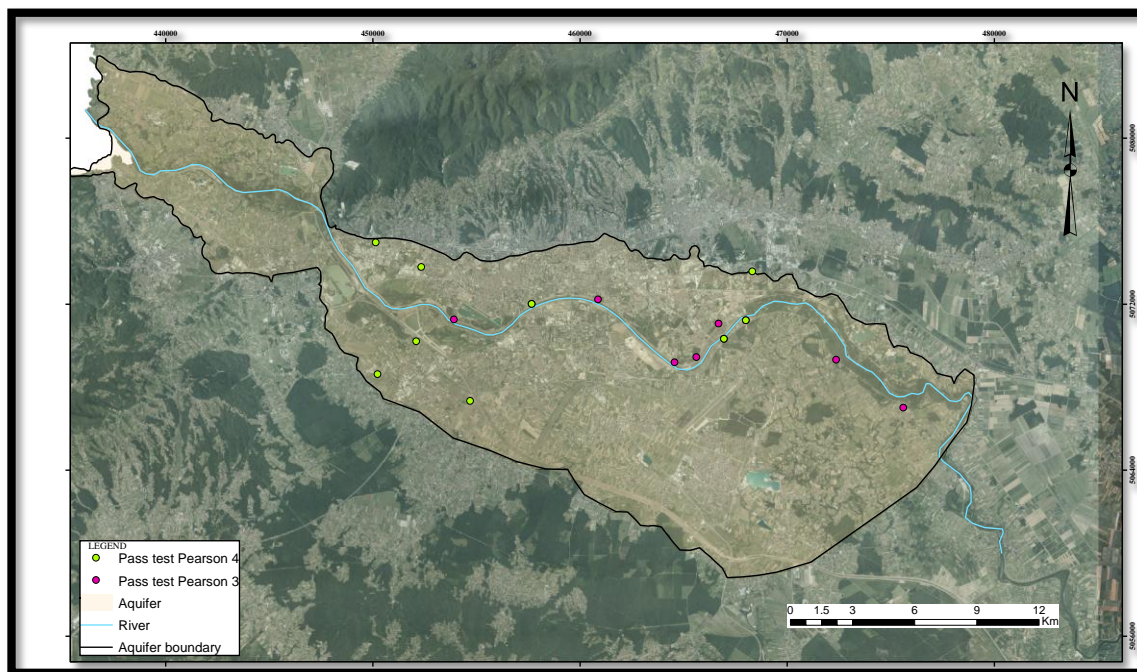
En una primera iteración la serie histórica ha sido dividida en 4 periodos. (Ver figura 8.2).



**Figura 8. 2** División de periodos primera iteración (Fuente: elaboración propia).

En los resultados obtenidos para esta división prácticamente la totalidad de los piezómetros no pasan la prueba de hipótesis para el periodo 3 y 4 y por lo tanto no se puede extrapolar los resultados para toda la población y afirmar que exista correlación. Este resultado se debe a que en estos periodos las correlaciones son más pequeñas con el aliciente de que hay pocas parejas de datos debido a lo reducido que son los periodos de estudio. Esto provoca que el valor asociado al coeficiente de correlación, P-value aumente drásticamente siendo en la mayoría de casos mayor a 0.05.

Los puntos que pasan la prueba de hipótesis con esta división se muestran en la figura 6.3, no siendo suficientes para la construcción de un mapa que de información acerca de la distribución espacial de la correlación.



**Figura 8. 3** Piezómetros que pasan la prueba de hipótesis. (fuente: elaboración propia)

La imagen muestra que los puntos que pasan la prueba de hipótesis son un 12% para el periodo 3 y un 10.8% para el periodo 4.

### 8.2.2 SEGUNDA ITERACIÓN

Finalmente se seleccionan tres periodos (Ver figura 8.4):

A) Periodo 1 (01/01/2013 – 01/04/2013), en el que a pesar de los alti-bajos el nivel freático tiene una tendencia creciente.

B) Periodo 2 (01/04/2013 – 10/11/2013), en el que el nivel freático tiene una tendencia decreciente.

D) Periodo 3 (10/11/2013 – 31/12/2013), en él se producen cambios bruscos los niveles de agua subterráneas, en el que se supone que es debido a un periodo de crecidas en aguas arriba de la sección de análisis. Surge la necesidad de analizar este periodo con mayor énfasis para conocer si pierde o gana correlación debido a que el nivel del agua nunca es constante ni prolongado por lo que puede variar la capacidad de infiltración.



**Figura 8. 4** Selección final de los diferentes periodos (fuente: elaboración propia).

## 9. METODOLOGÍA.

En este capítulo se resume de manera esquemática los pasos realizados para obtener los resultados.

1. Interpolación de los puntos de medida del río y comprobación del efecto ducha. (Capítulo 7.1)
2. Selección de piezómetros y comprobación de la serie histórica de cada selección. (capítulo 7.2)
3. Selección de la partición de los diferentes periodos. (capítulo 7.3)
4. Implementación de dos modelos. (Capítulo 9)
5. Emparejamiento de variables. (Capítulo 9)
6. Programación de los coeficientes. (Capítulo 9)
7. Prueba hipótesis. (Capítulo 9)
8. Interpolación con la ayuda de Arcgis.

### 9.1 MODELOS

Para éste estudio se han construido dos modelos debido a que los mecanismos del flujo en medios porosos provocan que el agua tenga una gran inercia y su velocidad sea lenta en el interior del acuífero. Por lo tanto, si hay correlación las variaciones en el nivel del río serán sentidas con un cierto desfase temporal en el acuífero, sobre todo en las partes más alejadas del río y de no ser así es necesario su comprobación.

Modelo 1: Correlaciona cada pareja de puntos de las variables día a día sin desfase temporal. Simplemente se basa en hacer coincidir las series históricas de cada variable para usar los coeficientes de correlación.

### Modelo 2:

El modelo busca desfazar temporalmente las series históricas de una de las variables para estudiar el efecto que produce en los valores de correlación.

Para ello se desfaza la serie histórica de cada piezómetro con respecto a la serie histórica del río. Se utiliza el coeficiente de Spearman en el periodo 1 y se calibra hasta obtener el mejor resultado de correlación. Tras ello se comprueba cuantos días han sido necesario desfazar la serie histórica. La figura 9.4 muestra los días que se han desfazado cada uno de los piezómetros según su posición espacial. El resultado obtenido es una distribución espacial de los días que tarda cada piezómetro en registrar la subida o bajada de nivel de agua del río en el acuífero.

Para añadir información al modelo se pretende programar un modelo aproximado de velocidades en el acuífero para conocer cuánto tarda una partícula de agua desde el río hasta un punto del acuífero. De esta forma se compara que los tiempos de viaje son mayores que el tiempo que tarda en sentir los cambios la relación río acuífero.

### Modelo de distribución de velocidades.

Modelo agregado de la distribución espacial de las velocidades y tiempos de viaje o de recorrido del agua desde un punto del acuífero al otro.

Se utiliza el programa ARCGIS para la construcción del modelo, con el objetivo de extraer un campo de velocidades aproximado. Para ello se utiliza el mapa de conductividad hidráulica  $k$  (Ver figura 2.8), como mapa base, él cual ya está dividido de forma agregada en áreas con las diferentes conductividades distribuidas espacialmente. A este mapa en formato Sheape se la han añadido nuevos campos, con la información suficiente para el cálculo del campo de velocidades aproximado. Los campos que componen el Sheape se describen a continuación:

- $K$ , conductividad hidráulica agregada. (Ver figura 2.8)
- $i$ , Gradiente hidráulico, extrapolado a partir de información del mapa de líneas equipotenciales. (Ver figura 9.2)
- $\Phi_e$ , Porosidad, extrapolado de un mapa en formato Sheape de la porosidad efectiva del acuífero.



Se programa con la herramienta “calculadora de campo” las siguientes fórmulas:

El gradiente hidráulico  $i$  es:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Donde  $\Delta h$  y  $\Delta l$  son la diferencia de altura piezométrica y la distancia entre pozo o líneas equipotenciales.

La conductividad hidráulica  $k$  es según la ley de Darcy:

$$k = \frac{q}{i}$$

Por lo tanto:

$$q = k * i$$

La velocidad real del flujo  $v$  es:

$$v = \frac{q}{\emptyset}$$

Por lo tanto:

$$v = \frac{k * i}{\emptyset}$$

$v$  = velocidad real del flujo.

Los resultados muestran una velocidad y tiempo de viaje orientativo para poder conocer cuánto tiempo tarda realmente una gota de agua desde el río a un piezómetro. No es objeto de este estudio modelos más complejos.

Por último se calcula aproximadamente el tiempo de viaje de una partícula desde el río hasta varios piezómetros:

$$t = \frac{e}{v}$$

Donde:

$e$  = El espacio que recorre desde donde analíticamente planteamos que sale la partícula de agua hasta el área donde tenemos la velocidad.

A. Desde el río al piezómetro 160, localizado al sureste del acuífero:

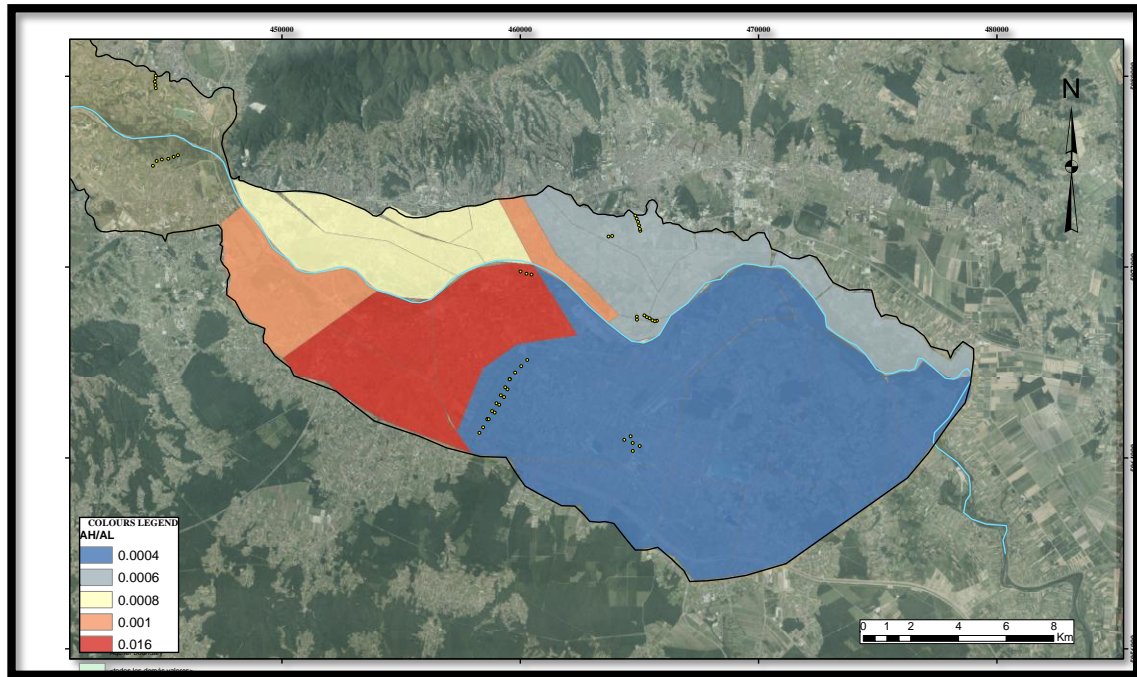
$$T=(4600/51.8)+(7200/1.728)+(3300/0.874) = 8031 \text{ días.}$$

B. Desde el río al piezómetro 5292, situado en la parte central del acuífero:

$$T= (5500/51.84) = 106 \text{ días.}$$

C. Desde el río al piezómetro 5035, localizado en la parte noreste del acuífero:

$$D. T= (2500/2.08) = 1200 \text{ días.}$$



**Figura 9. 1** Gradiente hidráulico, distribución espacial (Fuente: elaboración propia)

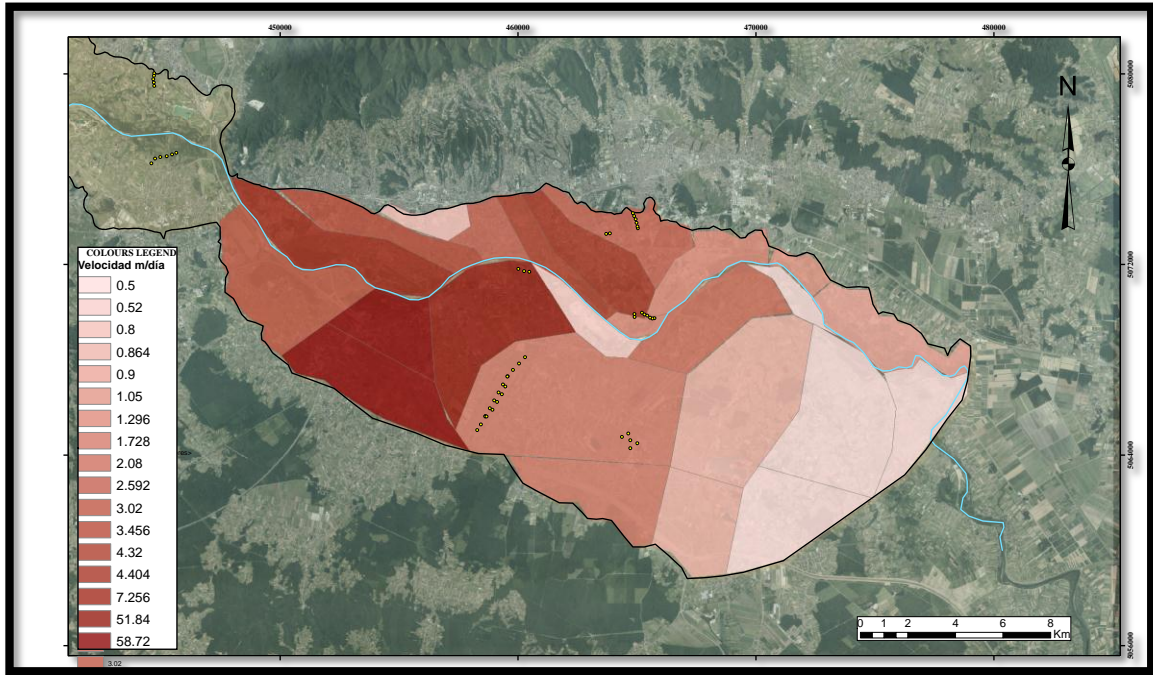


Figura 9. 2 Campo de velocidades, distribución espacial (fuente: elaboración propia)

El resultado del tiempo de desfase de cada piezómetro puede verse en la figura 9.3

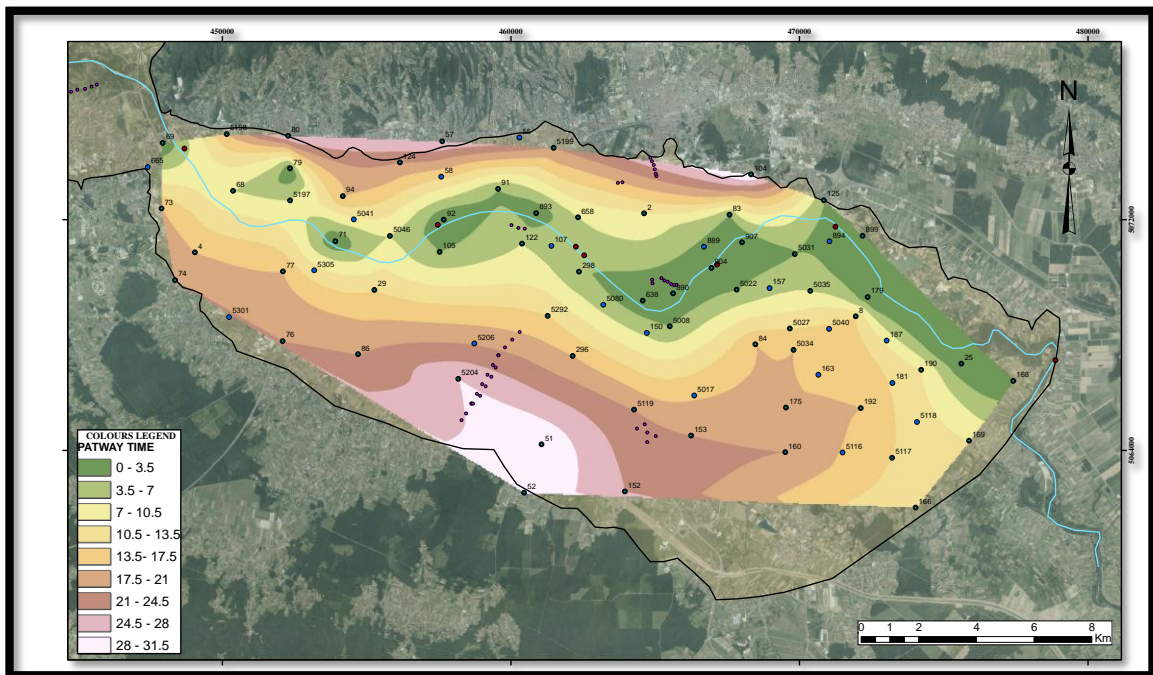
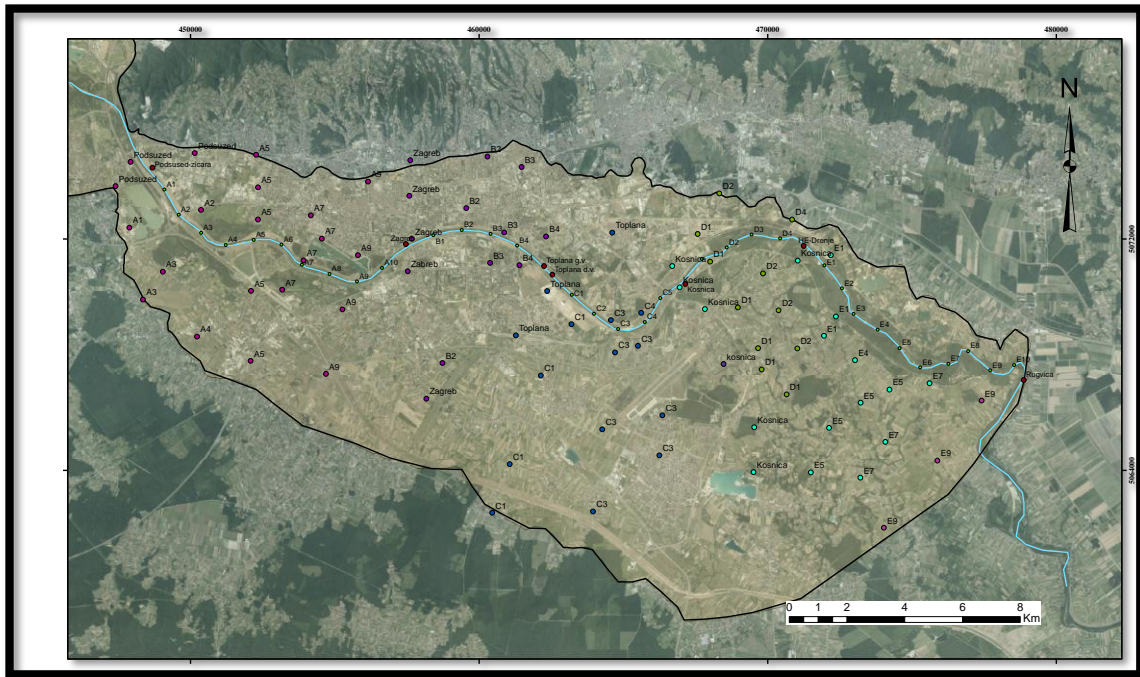


Figura 9. 3 Tiempos de desfase, desde río hasta los piezómetros de control en días (Fuente: elaboración propia).

## 9.2 EMPAREJAMIENTO DE VARIABLES

En primer lugar se muestra una imagen resumen que da información acerca de qué punto de medición del río se ha relacionado con cada piezómetro. (Ver figura 9.1 o Anejo 2). El criterio utilizado ha sido mediante la herramienta de proximidad basadas en entidades con el programa Arcgis, seleccionado el punto de control del río más cercano a cada piezómetro.



*Figura 9.1 Emparejamiento de ambas variables (Fuente: Elaboración propia)*

Cada piezómetro se ha correlacionado con su punto del río más cercano. Cada día de información se ha cruzado con el mismo día de información en la otra variable para el modelo 1 y en el modelo 2 la variable nivel del río se ha retrasado los días calculados en el capítulo 9.1 Esto supone un trabajo arduo pues se debe analizar piezómetro a piezómetro.

### 9.3 PROGRAMACIÓN DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

En la tabla 9.1 se muestra todos los coeficientes de correlación programados en una hoja de cálculo.

Tabla 9.1 Coeficientes de correlación (Fuente: elaboración propia)

Summry name	Full name
Pearson	Pearson for full period
Pearson 1	Pearson for period 1
Pearson 2	Pearson for period 2
Pearson 3	Pearson for period 3
Pearson 3.1	Pearson for period 3 in the first analysis
Pearson 3.2	Pearson for period 4 in the first analysis
Spearman	Spearman for full period
Spearman 1	Spearman for period 1
Spearman 2	Spearman for period 2
Spearman 3	Spearman for period 3
Spearman 3.1	Spearman for period 3 in the first analysis
Spearman 3.2	Spearman for period 4 in the first analysis

Las funciones utilizadas en la hoja de cálculo han sido:

Pearson: =Coef. De. Correl

Spearman: 1º = jerarquia (de cada variable), 2º =Coef.De.Correl

### 9.4 PRUEBA DE HIPÓTESIS

Modelo planteado:

**H<sub>0</sub> = No existe correlación lineal entre la variable nivel de agua en el río y la variable nivel de agua en el acuífero.**

**H<sub>1</sub> = Existe correlación lineal.**

Si el valor  $p \leq \alpha$ , rechazar Ho

Si valor  $p > \alpha$ , aceptar Ho

Siendo  $\alpha = 0.05$

Se realiza la prueba de hipótesis a cada uno de los coeficientes de correlación calculados, si no se consigue rechazar la hipótesis nula y no pasa la prueba, éste valor se considera no significativo y por lo tanto no se puede extrapolar a toda la población. Por lo cual es eliminado y no tenido en cuenta para dibujar lo mapas.

## 10. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Todos los resultados numéricos pueden ser consultar en el anejo 12 y 13

### 10.1 PRIMER MODELO

El modelo 1 mide la fuerza de la correlación en cada piezómetro con el río, de manera instantánea, es decir, con qué intensidad siente el acuífero una subida o bajada del nivel del río en el momento que se produce. Es por ello que debido a la mecánica de funcionamiento de los acuíferos y a la inercia de los mismos, esta reacción se prevé menos sentida en las partes más alejada del acuífero en ese periodo corto de tiempo de un día.

A pesar de saber que las dos variables de estudio no siguen una distribución normal, se ha analizado los resultados para el coeficiente de Pearson como parte de la investigación. La figura 10.1 y Anejo 3 muestra el resultado de la interpolación con el coeficiente de Pearson y utilizando el método de vecino natural. La figura 10.2 y Anejo 6 muestra el resultado utilizando el mismo método de interpolación pero con los coeficientes de Spearman. Ambas imágenes se centran en la evaluación de toda la serie histórica para conocer la correlación media de todas las estaciones.

Del análisis se desprende que la totalidad del acuífero esta correlacionado, pero ésta correlación pierde fuerza en las cercanías a los bordes del acuífero, pues hay otros input que adquieren fuerza como las precipitaciones o la entrada de agua al acuífero.

En el primer modelo los resultados muestran que las correlaciones son medias y bajas en las proximidades al campo de pozos de Mala Mlaka, sobre todo en la parte sur de los bombeos. Es decir que hay una mala respuesta instantánea de la subida o bajada de los niveles del acuífero cuando sube el nivel del río.

Hay resultados de 0.6 a 5 Km del acuífero, siendo éste valor muy alto para la lejanía del aporte. Tras un análisis en profundidad se descubre que en las partes donde el río adquiere una forma de meandro y describe una curva cóncava, la correlación es mayor (Ver figura 10.2 indicación A y B) mientras que en las áreas que quedan fuera o alejada de las curvas tienen una correlación menor o nula. Esto es debido a la mecánica del acuífero puesto que como se muestra en la figura 2.9 (Líneas equipotenciales) la dirección del flujo va de oeste a este y las partes más alejadas del río y que no quedan encerradas por la curva, reciben su agua de puntos aguas arriba, tarda más tiempo en llegar el flujo y por ello la correlación instantánea es floja o no existe. (Ver figura 10.1 y 10.2 o Anejo 3 y 4).

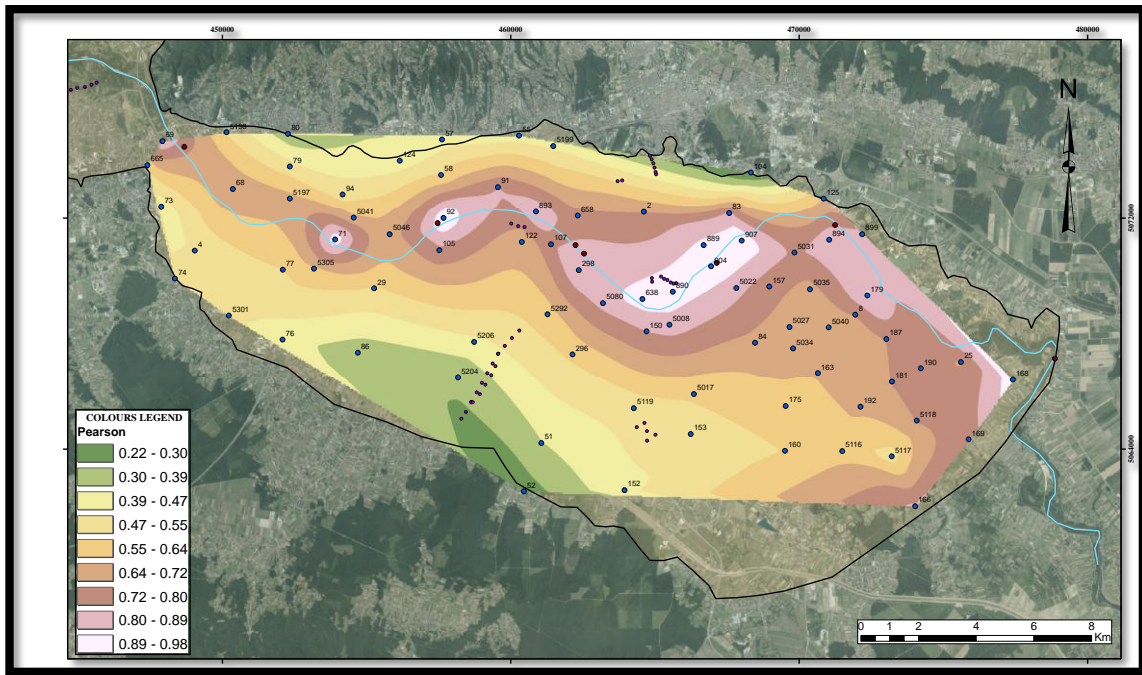


Figura 10. 1 Interpolación con el coeficiente de correlación de Pearson y con el método de vecino natural para el periodo completo (Fuente elaboración propia).

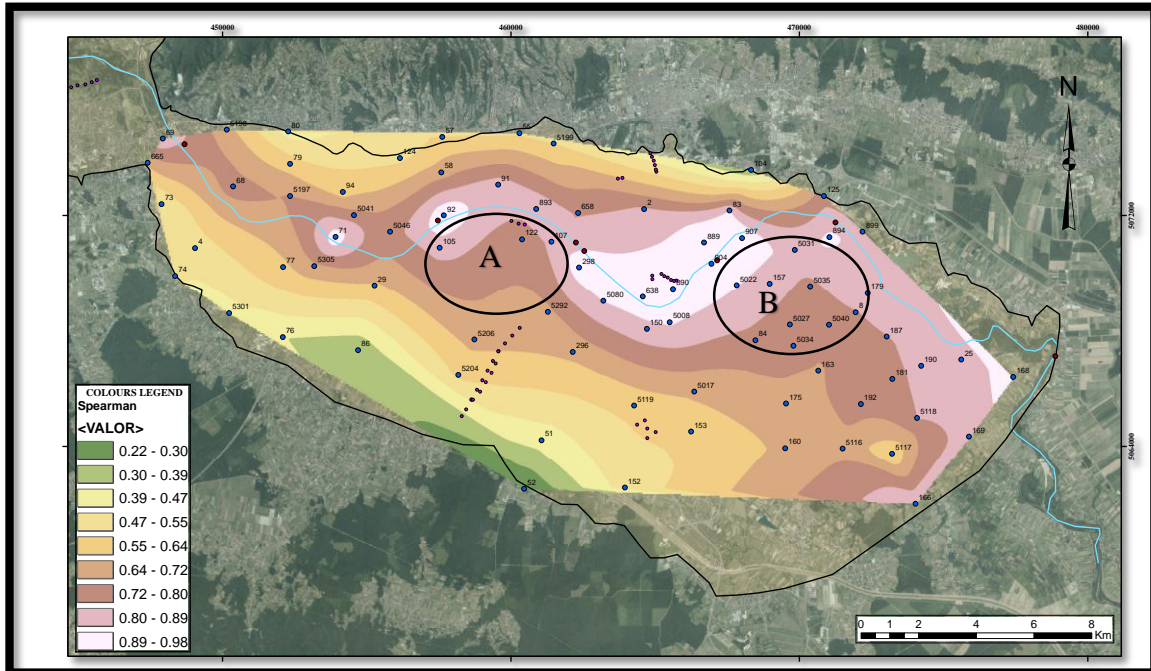
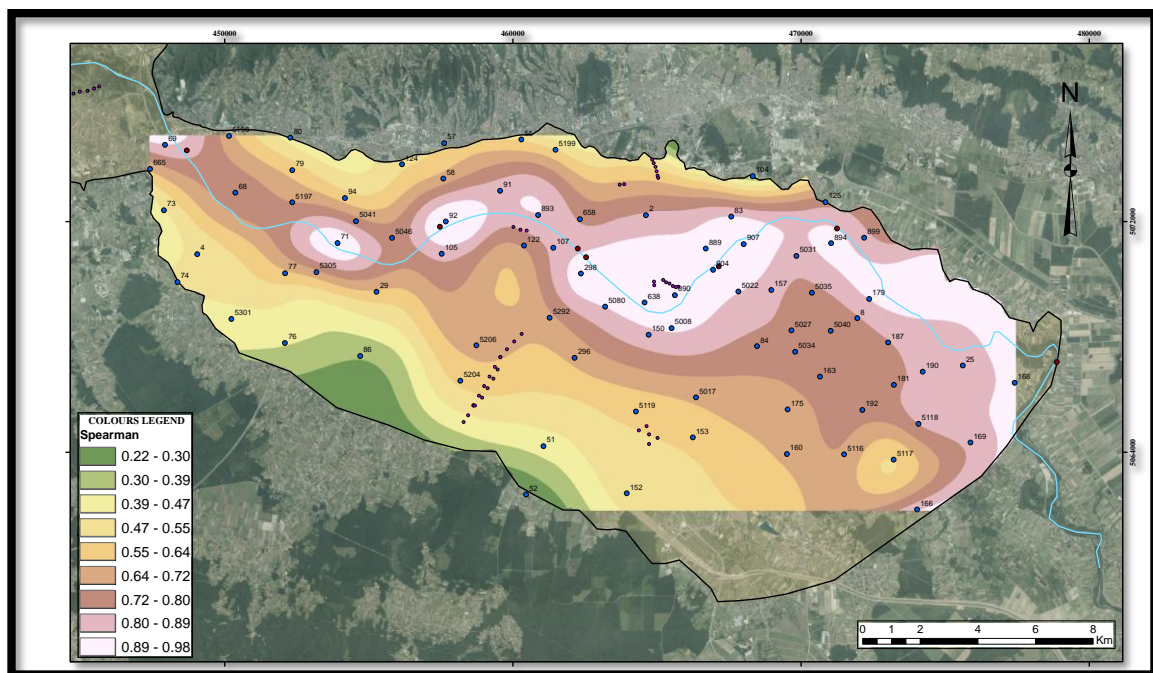


Figura 10. 2 Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de interpolación de vecino natural para el periodo completo (Fuente: elaboración propia)

Acorde al capítulo 9, se calculan los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman para todos los periodos, se concluye que el coeficiente de Spearman muestra mejores resultados debido a que es un coeficiente no paramétrico.

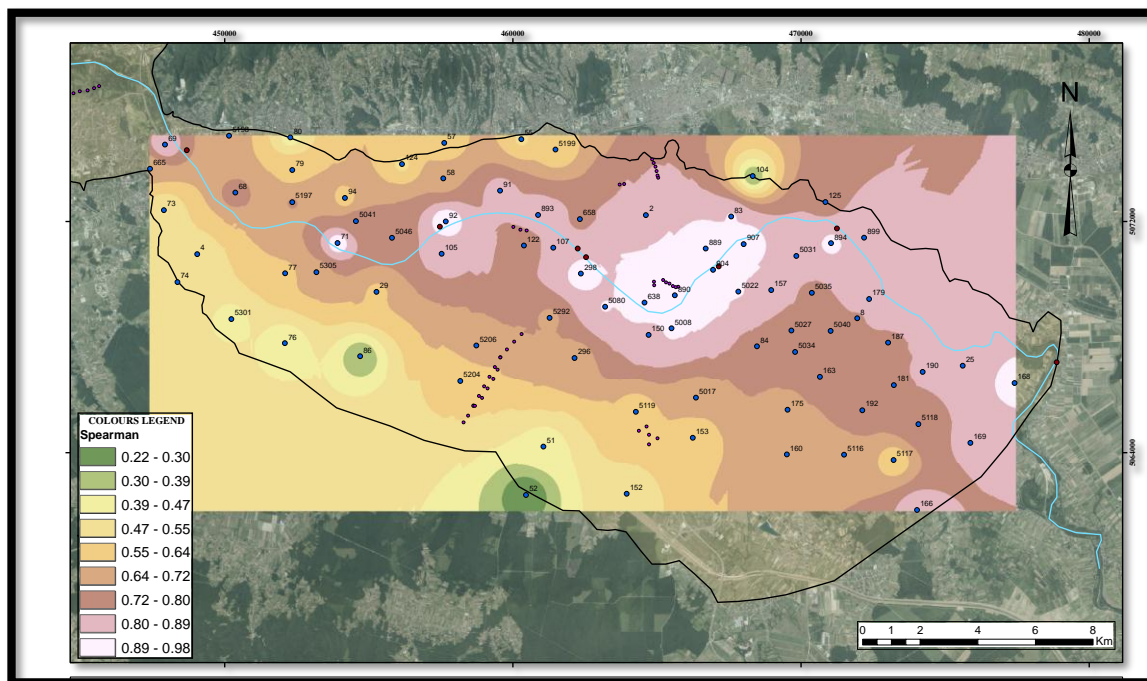
A continuación se muestran los mapas obtenidos tras utilizar diferentes métodos de interpolación para el mismo periodo, (Ver Figura 10.2, 10.3 y 10.4) De esta manera se han comparado los resultados y se ha elegido el mapa que más se adapta a las necesidades. Las tres técnicas utilizadas son Split, distancia media y Vecino Natural. (Ver capítulo 4)

El tipo de interpolación que mejor se adapta a las necesidades es el método de Vecino Natural porque es el que mejor se ajusta al tipo de dato que se está utilizando porque no hace falta modificar parámetros para hacer la interpolación, simplemente depende de la calidad o exactitud de los datos incluidos en la muestra elegida y no de decisión del modelador. Además el método de Vecino Natural termina la interpolación en el último dato. Por ello a partir de ahora en la mayoría de mapas se utilizara esta técnica de interpolación.



**Figura 10. 3** Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y método de interpolación de Split para el periodo completo (Fuente: elaboración propia).

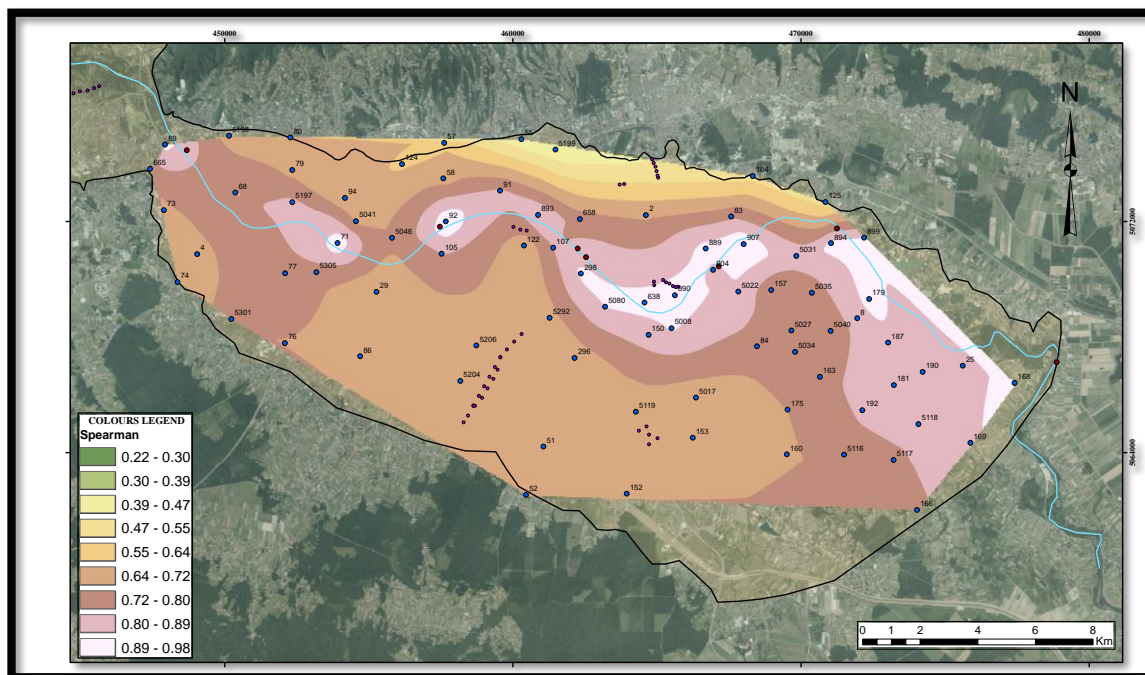




**Figura 10. 4** Interpolación con el coeficiente de correlación de Spearman y con el método de IDW para el periodo complete (elaboración propia).

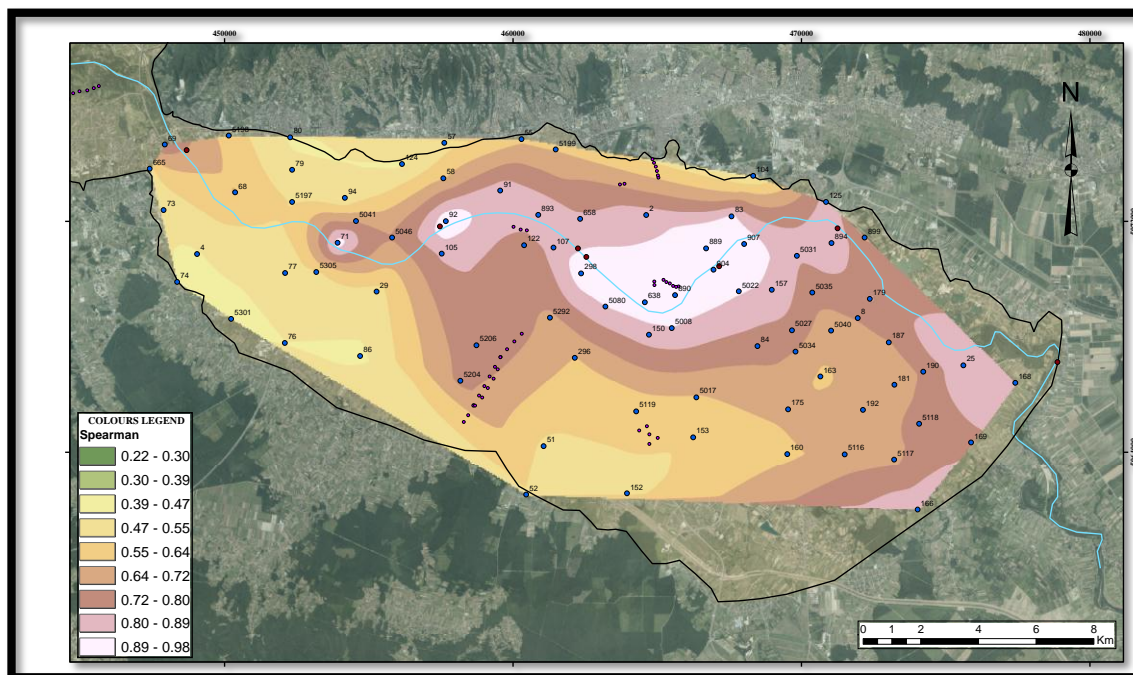
A continuación se evalúan los diferentes periodos descritos en el capítulo 8.2.

Durante el periodo 1, los niveles de agua crecen y decrecen pero con una tendencia claramente ascendente. Los niveles del río también suben y bajan pero de una forma suavizada, es decir hay periodos de más de un día en el que el calado está bajo o alto. Por lo cual el acuífero tiene tiempo suficiente de reacción. La distribución espacial de la correlación en este periodo del año es similar a la del periodo completo, se acentúa la correlación en el este y en términos generales la correlación está por encima de 0.65 en la totalidad del acuífero por lo que se puede afirmar que existe un nexo fuerte entre ambas variables. (Ver figura 10.5 y Anejo 5).



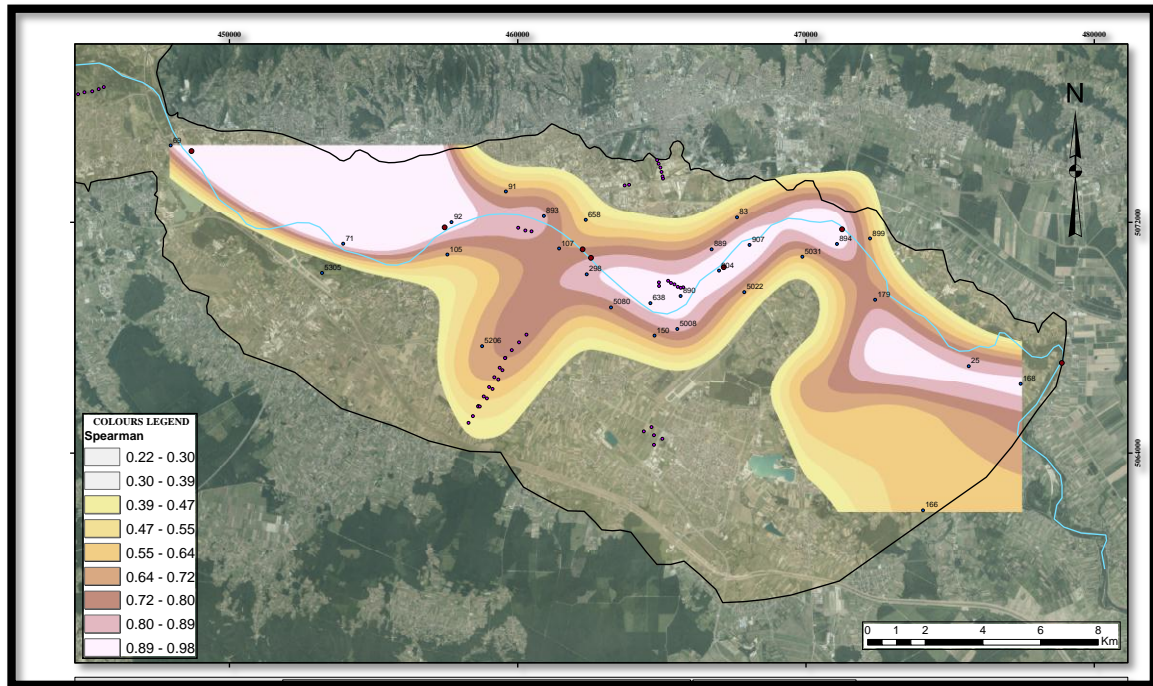
**Figura 10. 5** Interpolación con el coeficiente de correlación de Spearman y con el método de interpolación de vecino natural para el periodo 1 (Fuente: elaboración propia).

Durante el periodo 2 el calado del río baja de manera muy pausada y suavizada y también es el periodo en el que más bajan los niveles del agua del acuífero. En esta época se pierde correlación instantánea en la parte oeste del acuífero, esto puede ser debido a que en esta el espesor de la capa más alta del acuífero es delgado y el nivel freático se coloque en la segunda capa (ver figura 2.2). En la parte este sigue siendo alta y en términos generales tiene peor correlación que en el periodo 1. Además, la correlación se acentúa en esta época de calado bajo en el área cercana a los campos de pozo, sobretudo Mala Mlaka. (Ver figura 10.6 o Anejo 6).



**Figura 10. 6** Interpolación con coeficiente de correlación de Spearman y con el método de vecino natural para el periodo 2. (Fuente: elaboración propia)

El periodo 3 es el más significativo ya que los puntos más alejados del acuífero dan correlaciones altas pero negativas. Analizando el suceso no existe sentido físico para tal resultado puesto que esta correlación indicaría que cuando sube el nivel del río baja el nivel del acuífero. Por ello se eliminan los puntos negativos y se trabaja solo con las correlaciones positivas. (Ver figura 10.7 o anejo 7) En el mapa aparece pintada la interpolación de los puntos que han dado un resultado positivo y además han pasado la prueba de hipótesis para este periodo, han sido solo los puntos cercanos al río y los puntos cercanos a los pozos de Mala Mlaka. Esto es porque el tiempo de viaje a estos puntos es pequeño y por lo tanto hay correlación instantánea. La característica de este periodo es que las subidas y bajadas en el calado son muy cortas en el tiempo y no suavizadas, por lo que se puede decir que esas zonas pintadas son las únicas que tienen correlación en tiempo real ante una crecida del río.

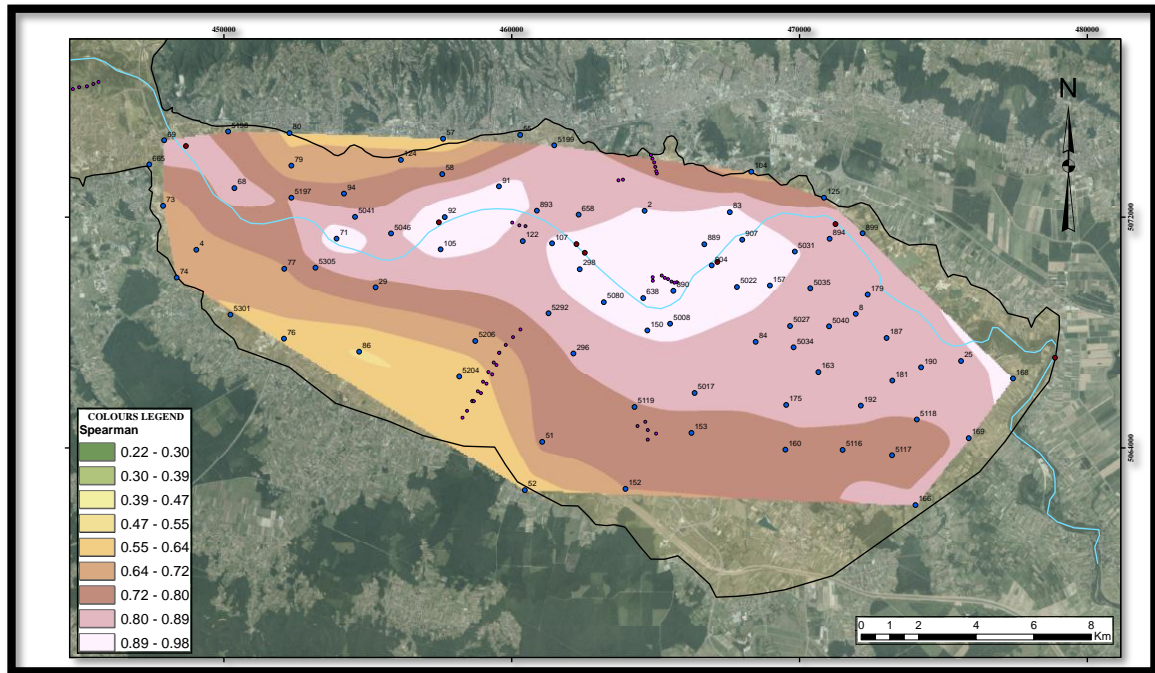


**Figura 10. 7** Interpolación solo con puntos de correlación positiva con el coeficiente de correlación de Spearman y con el método de interpolación de vecino natural para el periodo 3. (Fuente elaboración propia).

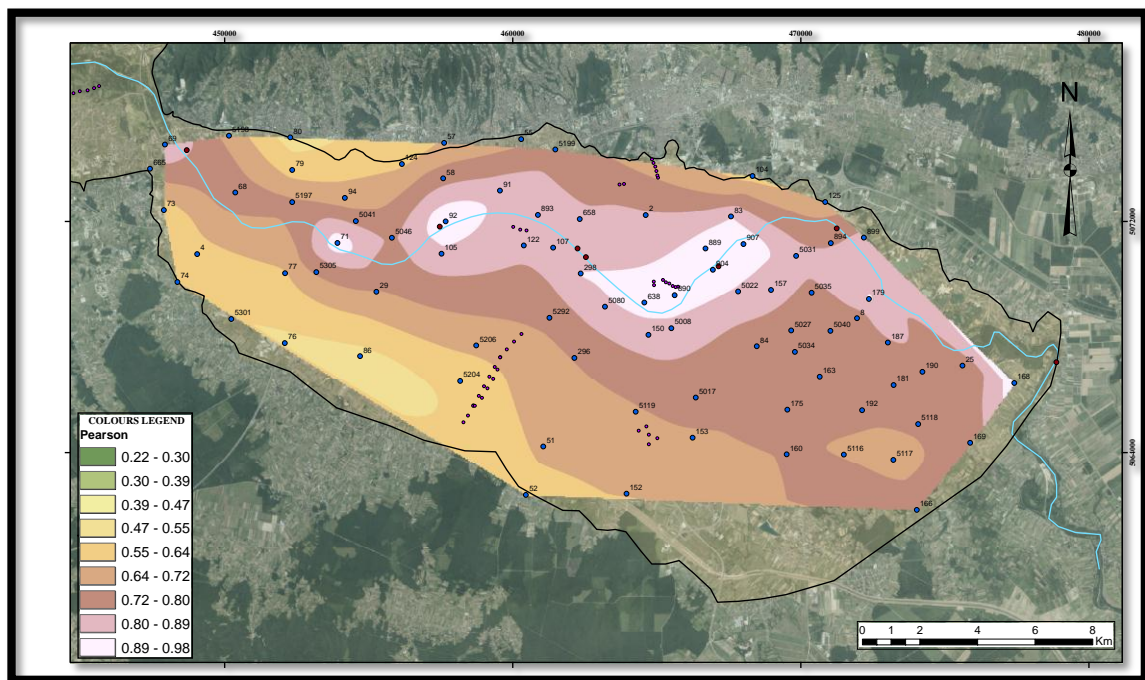
## 10.2 SEGUNDO MODELO

El Segundo modelo nace a raíz de los resultados no físicos del periodo 3 en el primer modelo. Se busca encontrar una explicación a las correlaciones negativas pero altas. Además el segundo modelo tiene como objetivo obtener información acerca de la correlación con un sentido más físico, construyendo un modelo a sabiendas de los mecanismos de velocidad del flujo en medios porosos. Para ello se desfasan las series históricas del río respecto al acuífero como se explica en el capítulo 9.1. Además se propone un modelo simplificado para obtener el campo de velocidades en los diferentes puntos del acuífero y obtener los tiempos de viaje para obtener más información del comportamiento del acuífero.

La figura 10.8 y 10.9 o Anejos 8 y 9 muestran la correlación con las series históricas desfasadas para el periodo completo tanto para Spearman como para Pearson respectivamente. Las correlaciones son muy altas, estando por encima de los 0.7 puntos en prácticamente la totalidad del área del acuífero. Siendo más acentuadas en la parte este del acuífero.

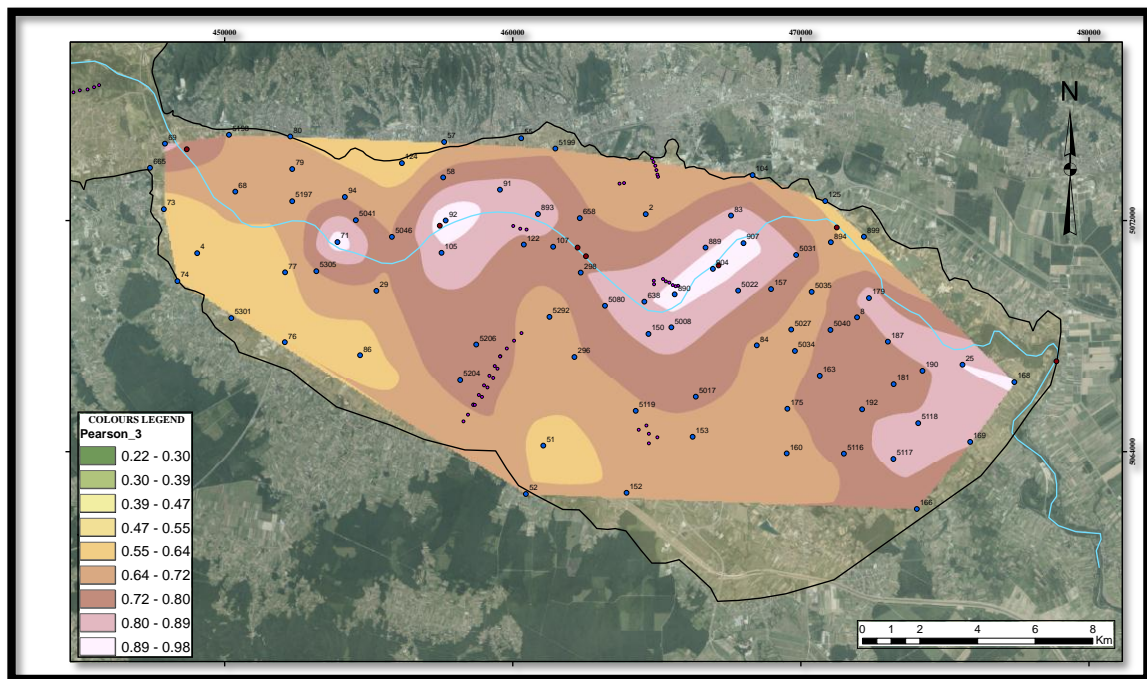


**Figura 10. 8** Interpolación con coeficiente de correlación Spearman y método de interpolación de vecino natural para el periodo completo y Modelo 2 (fuente: elaboración propia).



**Figura 10. 9** Interpolación con coeficiente de correlación de Pearson y con método de interpolación de vecino natural para el periodo completo y Modelo 2. (Fuente: elaboración propia)

La Figura 10.10 y anejo 10 muestra la correlación desfasada del periodo 3 que es el más conflictivo y consigue explicar físicamente lo que ocurría con las correlaciones negativas. Es decir en el modelo 1 solo tenía significado físico las correlaciones de los piezómetros cercanos al río puesto que el tiempo de viaje no excedía los 3 días y por lo tanto estaban dentro del margen, pues las mediciones se realizan cada tres días. Con este sistemas vemos como sigue conservando las correlación en el periodo 3 y como en el área cercana al campo de pozos la correlación se acentúa.



**Figura 10. 10** Interpolación con coeficiente de correlación de Pearson y método de interpolación de Vecino Natural para el periodo 3 y método 2. (Fuente: elaboración propia)

## 11. PROPUESTA DE INFRAESTRUCTURA

En el capítulo 3.2 se resumen los problemas que amenazan el sistema acuífero de Zagreb. Como en cualquier sistema de recursos hídricos, cuando afloran los problemas de sostenibilidad o déficit, una de las primeras decisiones es bajar las diferentes demandas. Esta medida ya se ha realizado en el caso del sistema acuífero de Zagreb, pero las tendencias siguen siendo negativas.

Una de las metas de este estudio es proponer medidas que estabilicen o cambien la actual tendencia negativa de los niveles de agua del acuífero. Tras el estudio de todos los factores y características del sistema más las nuevas características que ha arrojado el presente estudio se puede concluir o dividir el acuífero en tres áreas. (Ver figura 11.1 y Anejo 11).

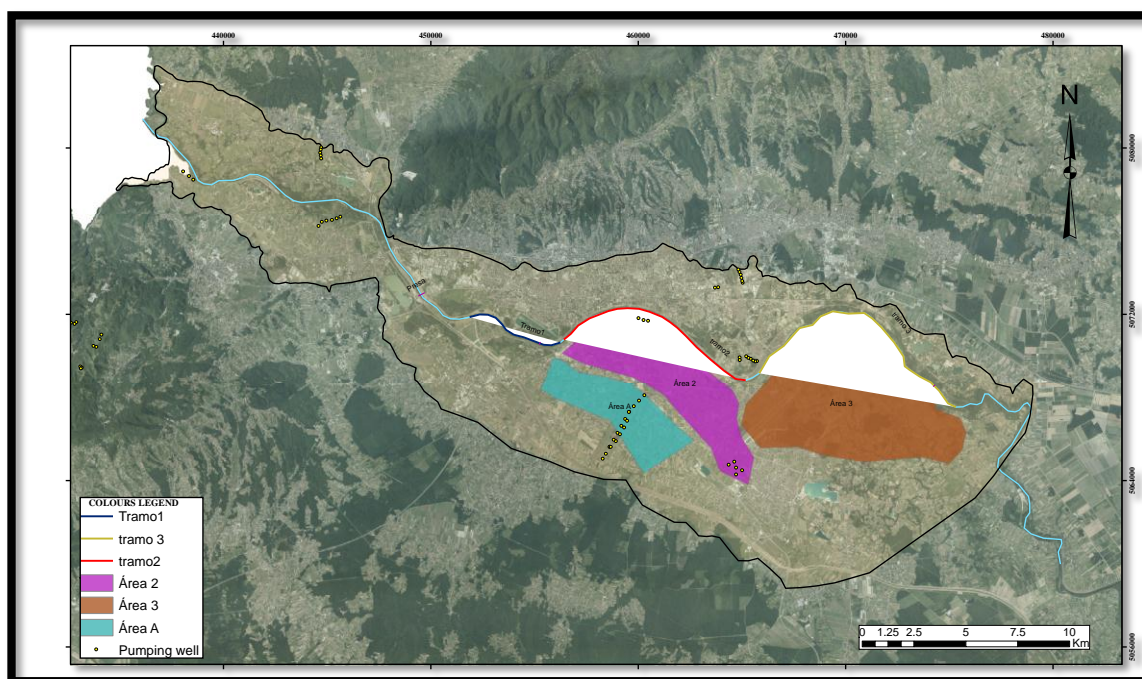
- Área 1; Esta área incluye la fracción norte del campo de pozos de Mala Mlaka. Es el área de toda la planta de bombeo que más correlación tiene con el río. Puesto que los resultados muestran que la parte Sur tiene correlaciones bajas-medias por lo que no se puede asegurar o extrapolar su correlación con el río. Se plantea la hipótesis de que gran parte del agua de esta zona provenga de la estrada de agua suroeste del acuífero.

Con la información de los mapas de líneas equipotenciales, mapas de correlación instantáneos y el mapa de tiempo de viaje (Ver figura 11.1) se puede afirmar que el agua de este área proviene del tramo 1 del río (Según la división de la figura 10.1). Por lo tanto las fluctuaciones en el nivel freático de este área están marcados por las subidas y bajadas del nivel del río en el tramo 1.

Es un área especialmente importante por la localización del Mala Mlaka y por lo tanto es importante mantener los niveles del acuífero estables en esta área.

- Área 2; Esta área incluye la zona del acuífero que actualmente se ve afectada por la presa TE-TO y por ende tiene los niveles más altos del acuífero. Tiene una alta correlación instantánea debido a su cercanía al río, tiempos de viaje bajos, además tiene una muy alta correlación en el modelo 2 también. Por lo que cualquier cambio en el río será altamente sentido en esta área del acuífero. Con la información de la cual se dispone se puede afirmar que el agua es cedida en el tramo 2 del río.
- Área 3; Se trata del área con mayor correlación de todo el acuífero tanto con el modelo 1 como con el modelo 2 y por lo tanto con un alto potencial si los

niveles de agua en el río son incrementados. Debido a las condiciones hidrogeológicas y de dirección del flujo se puede afirmar que el tramo 3 cede gran parte de su agua hacia el sur del acuífero recargando en un gran porcentaje esta área.



**Figura 10. 11** Áreas de interés del acuífero y tramos de interés del río (Fuente: elaboración propia).

A la vista de los resultados se propone un plan de estratégico de planificación de futuras infraestructuras para indagar en la sostenibilidad del acuífero y prevenir la degradación de los ecosistemas que dependen del sistema aguas abajo.

1. Medida 1; Modificación de la regulación del río Sava, con el objeto de convertirse en una gestión conjunta entre los diferentes estados que componen la cuenca del río Sava. Se propone un símil a un caudal ecológico a su paso por Zagreb, para establecer un caudal mínimo que establezca los niveles de agua subterránea ya que tras el estudio se puede afirmar la alta correlación del sistema superficial y subterráneo. En la actualidad existe un organismo parecido al propuesto Framework Agreement on the River Basin (ISRBC) en el cual deben trabajar en estas líneas.
2. Medida 2; Construcción Azud 2 (Ver figura 11.2). Tras la revisión de la literatura y como se expone en el capítulo 3.1 existen infraestructuras similares en las inmediaciones de Zagreb que han provocado un cambio en la tendencia de los niveles del acuífero que modifican el funcionamiento del acuífero, pero que no han sido suficientes. La construcción del Azud 2 tiene como objetivo principal



modificar la lámina libre en el tramo 1, de forma que los niveles agua en el área 2 suban. Es motivo de estudio en profundidad su diseño, dimensionamiento y su pronosticable efecto en esta área.

3. Medida 3; Construcción Azud 1 (Ver figura 11.2). Con el objetivo de subir los niveles de agua en el área 3 y de esta forma poder explotar el potencial de esta parte del acuífero debido a su alta correlación con el río. Por ejemplo con la localización de nuevos campos de pozos.
4. Medida 4; construcción de presa regulación (Ver figura 11.2), como se observa en la figura 2.13 se prevé la construcción de una presa de generación hidroeléctrica en el mismo lugar, debido a que este terreno puede albergar el vaso de un pequeño embalse. Se pretende cambiar el uso de esta presa a presa de regulación, debiendo estudiar en profundidad si el volumen del vaso es el necesario para que la medida tenga efecto, con el fin de establecer una regulación desde este punto de un caudal mínimo que atraviese esta zona del acuífero para la estabilización anual de los niveles del acuífero. De esta forma la regulación estaría en manos de Zagreb. Pues en la actualidad las únicas presas de gestión de agua se encuentran aguas arriba de la ciudad de Liubliana.

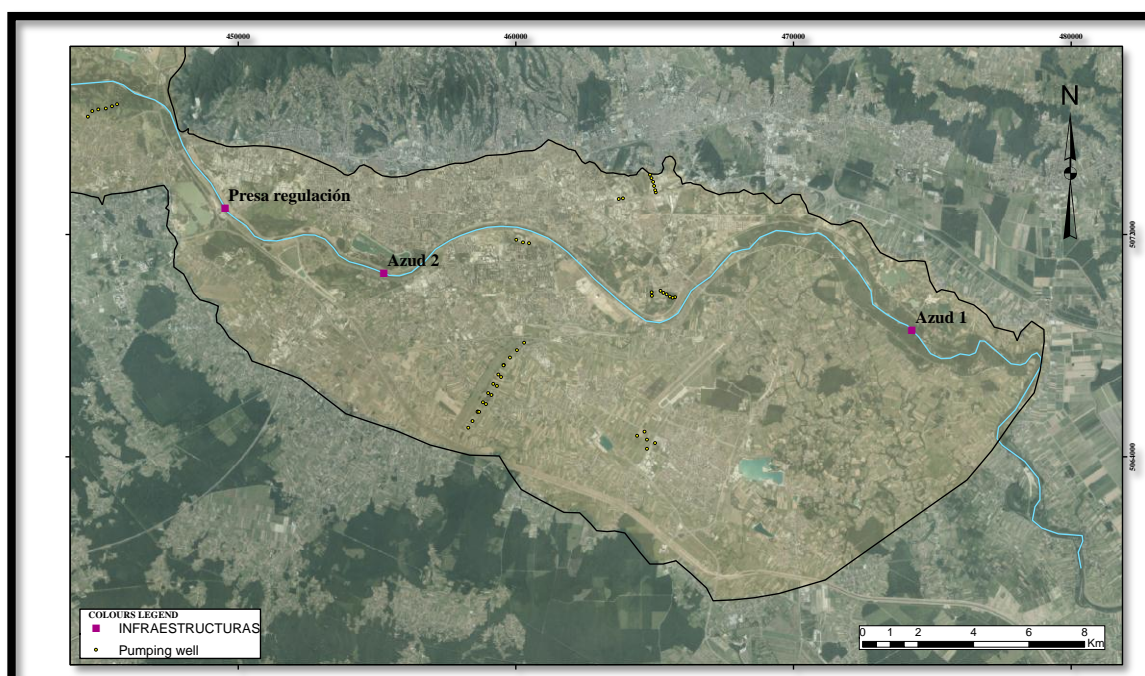


Figura 10. 12 Propuesta futuras infraestructuras (Fuente: elaboración propia)

## 12. CONCLUSIONES

Del estudio previo a la presente investigación, se extrae como conclusión principal el estado en riesgo del campo de pozo de Mala Mlaka. Éste hecho debe su causa a la tendencia decreciente de los niveles de agua subterránea en sus proximidades. La actual investigación añade información de las características del acuífero y afirma hipótesis planteadas en estudios previos. La primera hipótesis que resuelve matemáticamente es la existencia de una correlación río-acuífero en la casi la totalidad de los límites del sistema. Por lo que se puede afirmar que una gran parte del volumen de agua subterránea proviene de la infiltración del sistema superficial, río.

A continuación se desgranar las principales conclusiones extraídas a partir los valores de los datos y la distribución espacial de los resultados;

- Las correlaciones son débiles y no significantes en las áreas distantes al río debido a que otras aportaciones de agua cogen fuerza, como pueden ser la precipitación o entradas de agua externas al sistema, en el límite suroeste.
- Las zonas que guardan una estrecha correlación con el sistema superficial están cercanas a los márgenes del río. Incluso en áreas de lejanía media (hasta 5 kilómetros perpendiculares a al perfil longitudinal) se alcanzan valores por encima de los 0.6 puntos acentuándose la correlación en la parte este del acuífero.
- Tras el análisis de la distribución espacial y temporal de las correlaciones con ayudado con los mapas, se establece que durante la época de aguas altas en el cauce del río las correlaciones son mayores como se observa al comparar el periodo uno con el dos en el modelo 1. Además con los niveles de agua en el río medio y bajos se pierde mucha correlación en la parte Oeste del acuífero. Por lo que se puede afirmar que con un caudal bajo solo hay drenaje en ciertas zonas., con un impacto muy negativo en época de sequias. La explicación a este suceso puede ser debido a que el nivel freático desciende hasta la segunda capa del acuífero, conformada por limos y arcillas, donde la velocidad se reduce drásticamente y por lo tanto la correlación es diferente, sobretudo con el modelo 1 (instantáneo). Recordar que en ésta parte del acuífero el espesor

varía entre 5 y 10 metros y el nivel desciende más de 3 metros de una época a otra.

- Cuando el nivel del agua del río es baja, la correlación en el área de los pozos de Mala Mlaka se incrementa (ver anejo 10) esto puede ser debido a los efectos del cono de depresión que provocan los bombeos.
- Si el nivel alto en el río no perdura al menos dos o tres días en el tiempo, no tiene apenas repercusión en los niveles de agua subterráneos por lo que se concluye que la recarga del acuífero mediante la herramienta del río debe ser constante y prolongada.
- Se plantea la hipótesis siguiente; en el periodo 2 las correlaciones bajan y las precipitaciones suben, es posible que adquiera más peso la lluvia en este periodo.
- Como se menciona en el capítulo 3, el estudio “The influence of the river dam Te-To on the Groundwater levels of Zagreb Aquifer” (Andrea BAČANI , Kristijan POSAVEC , Tatjana VLAHOVIĆ and Sandra TUCAK-ZORIĆ, 2013) hay ciertos piezómetros del estudio que no modificaron su tendencia tras la construcción de la presa, tras este estudio podemos afirmar que estos piezómetros o zonas del acuífero no se ven afectados por el cambio en los niveles del río por su baja correlación y son las áreas que se muestran con los coeficientes por debajo de 0.4 en los diferentes mapas.
- Los niveles de agua del acuífero tienen una correlación desplazada temporalmente con los niveles de agua del río (Ver figura 9.3). En los cuales los resultados de correlación son mejores. No obstante si se comparan con el tiempo de viaje de una partícula desde el río a un piezómetro los tiempos son mucho mayores. Por lo tanto esto es debido a la onda que va modificando las cotas piezométricas cuando suben los niveles del río.

Conclusiones de segunda magnitud;

- La colocación de nuevas áreas de pozos debe ser en un lugar por encima de una correlación de 0.8 puntos, para asegurar que futuras intervenciones en el río afecten al acuífero y por lo tanto permitan crear mecanismos de regulación del sistema subterráneo y los pozos.
- El descenso del nivel freático y de los pozos están en riesgo porque cabe la posibilidad de tener que sumergir la cabeza de la bomba. Con la consecuencia de extraer el agua del segundo acuífero o la capa más baja que supondría un mayor coste energético debido a la geología y su carácter limo arcilloso.
- La nueva área donde se proponen los pozos también tienen características de fluviosoles y por lo que tienen una tendencia alta a la práctica de la agricultura, dando posibilidad de contaminación por Nitratos y Fosfatos que se debe cuidar.
- La subida o estabilización de los niveles de agua del acuífero con nuevas infraestructuras puede suponer un ahorro energético importante en las estaciones de bombeo, esto da pie a un estudio coste-beneficio de las futuras infraestructuras a implantar.
- Las variables de estudio no adquieren una distribución normal o Guasiana. La literatura explica que debido a este hecho, se inhabilita la posibilidad de utilizar el coeficiente de Pearson o que este coeficiente dará un resultado distorsionado de la realidad. No obstante en el presente estudio los resultados obtenidos entre Pearson y Spearman son muy parecidos, aunque Spearman muestra mejores resultados.
- Tras afirmar que la mayoría de la recarga actual del acuífero proviene del río, es importante plantear el cuidado químico del río, pues un foco contaminante en el río puede ser rápidamente trasladado al acuífero, sobretodo de partículas

las cuales no pueda auto depurar el acuífero. A sabiendas las velocidades altas que se dan en las cercanías al acuífero.

- En el año 2000 la extracción se han regulado o se han estabilizado gracias a la disminución de las cantidades destinadas a la industria y al hecho de que a disminuido el consumo de agua per cápita. A pesar de este decrecimiento en la extracción, la tendencia sigue siendo a disminuir los niveles de agua subterránea, Una tendencia negativa con la serie histórica larga se registra en casi todos los piezómetros del acuífero independientemente de la profundidad del acuífero en el que se miden los niveles.

## REFERENCES

1. FOTHERINGHAM, S. & ROGERSON, P. (2005): Spatial Analysis and GIS.
2. Sava River Basin Analysis Summary. (December 2010)
3. BAČANI, A., POSAVEC, K., VLAHOVIĆ, K., & TUCAK-ZORIĆ, S. (2011): The Influence of the River Dam Te-To on the Groundwater Levels of Zagreb Aquifer, Balint 4.G. and Domonkos M. (eds), XXVth Conference of Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management.
5. Análisis de correlación y Regresión Capítulo 13
5. DR. HELSEN AND R.M HIRSCH (2002): Statical Methods in Water Resources , Chapter A2. Statistical Methods in Water Resources
6. Juan Oramas (2016); DEVELOPMENT OF EQUIPOTENTIAL HEAD MAPS IN ZAGREB AQUIFER SYSTEM USING DIFFERENT INTERPOLATION METHODS.
7. BOGUNOVIĆ, M., VIDAČEK, T., HUSNJAK, S., SRAKA, M. & PETOŠIĆ, D. (1998): Zemljišni informacijski sustav Zagrebačke županije [Land Information System of Zagreb Country – in Croatian].– *Agriculturae conspectus scientificus*, 63/4: 219–231.
8. CHILDS, C. (2004): Interpolating Surfaces in ArcGis Spatial Analyst. ESRI Education Services.
9. JOHN H. MCDONALD.(2010) Handbook of biological statistics.
10. BAČANI, A., POSAVEC, K. & PARLOV, J. (2010): Groundwater quantity in the Zagreb aquifer. – In: Zuber, A., Kania, J. & Kmiecik, E. (eds.): XXXVIII IAH Congress Groundwater Quality Sustainability, Krakow, September 12–17, 2010.
11. The Danube and its Basin – Hydrological Monograph, 2006
12. FAO (1998): FAO–UNESCO Soil Map of the World: revised legend. – World Soil Resources Rep 60. FAO/UNESCO/ISRIC, Rome.
13. FAO (2007): FAO – UNESCO World Reference Base for Soil Resources, First update. FAO/UNESCO/ISRIC, Rome.
14. BABIĆ-MLADENOVIĆ, M., BEKIĆ, D., GROŠELJ, S., MIKOŠ, M. & OSKORUŠ, D. (2013): Towards Practical Guidance for Sustainable Sediment Management using the Sava River Basin as a Showcase. Estimation of Sediment Balance for the Sava River.

International Sava River Basin Commission (ISRBC) in cooperation with the Core expert group from the Parties to the Framework Agreement on the Sava River Basin.

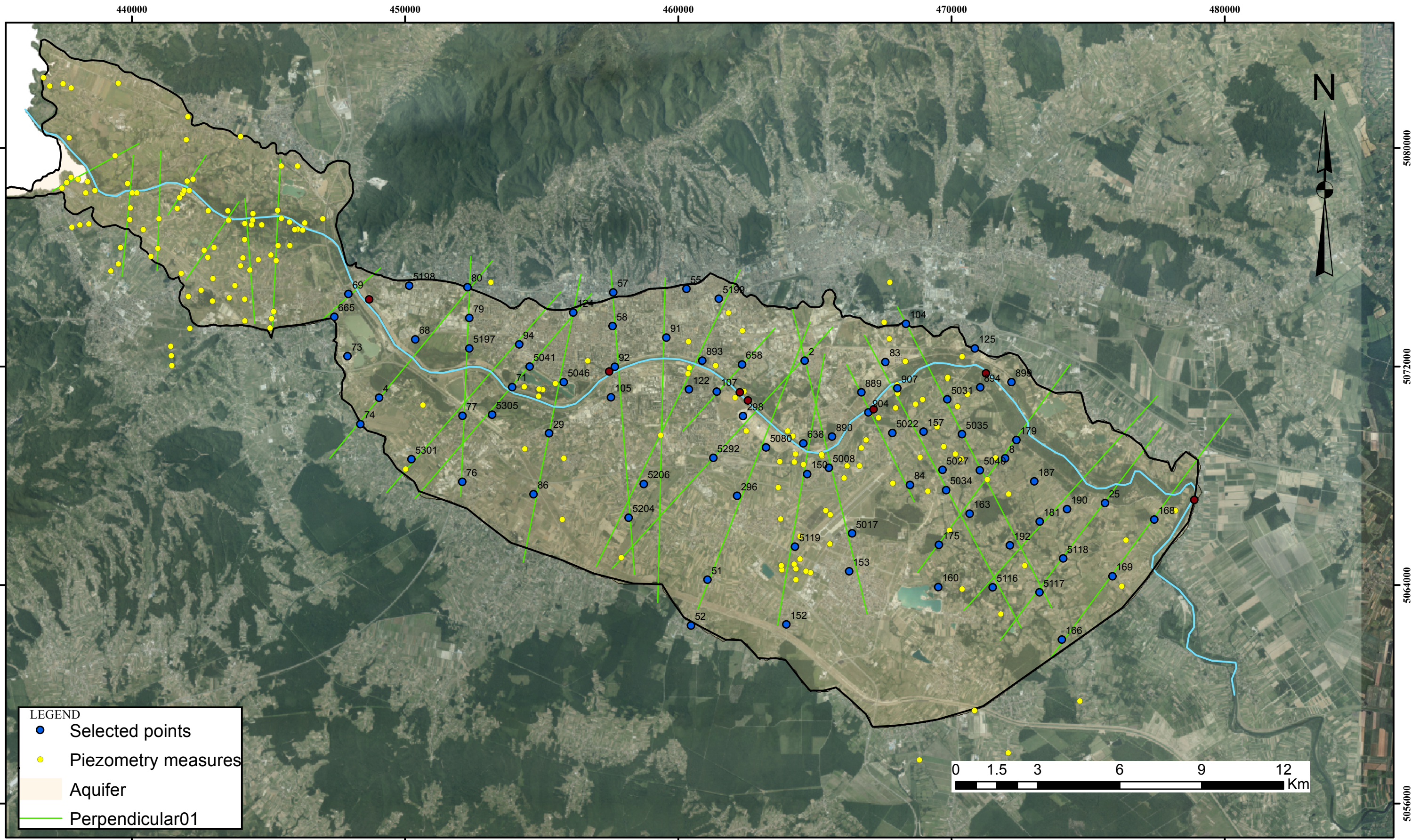
15. GENESIS (2011): Groundwater Surface Water Interaction in GDE, Deliverable D4.2 version 2.0. Pages 144.
16. HRUŠKA, V. (2015): Utjecaj oborina na koncentracije nitrata u podzemnoj vodi na priljevnom području crpilišta Mala Mlaka (engl. The Effect of Precipitation on the Groundwater Nitrate Concentrations in the Inflow Area of Well Field Mala Mlaka), Master Thesis, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb.
17. BRKIĆ, T., LARVA, O. & URUMOVIĆ, K (2010): The quantitative status of groundwater in alluvial aquifers in norther Croatia. *Geologia Croatica*, 63/3, 283-298.
18. MÓNICA ALEJANDRA MONDRAGON BARREAR (2014); Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia.
19. ROMIĆ, D., ROMIĆ, M., DOLANJSKI, D., STRIČEVIĆ, I., ONDRAŠEK, G., MAUROVIĆ, N., KONDRES, N., HUSNJAK, S. & HENGL, T. (2005): Održivost agro-ekosustava na području Grada Zagreba s obzirom na onečišćenost teškim metalima. *Studija. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.*
20. NAKIĆ, Z., BAČANI, A. & PERKOVIĆ, D. (2003): Hydrodynamic zoning of complex aquifer systems: the Zagreb aquifer (Croatia), *RMZ Materials and Geoenvironment* Vol. 50, No.1.
21. KLOVE, B., ALA-AHO, P., BERTRAND, G., ILMONEN, J., KARAKAYA, N., ERTÜRK, A., GOLDSCHIEDER, N., KUPFERSBERGER, H., KVOERNER, J., LUNDBERG, A., MILEUSNIĆ, M., MOSZCZYNSKA, A., MUOTKA, T., PREDÁ, E., ROSSI, P., SIERGIEIEV, D. ŠIMEK, J., WACHNIEW, P. & WIDERLUND, A. (2011): Groundwater Dependent Ecosystems Part I: Hydroecological status and trends.- *Environmental Science & Policy*, doi:10.1016/j.envsci.2011.04.002. 14. LEDOUX, H. & GOLD, C. (2004): An Efficient Natural Neighbour Interpolation Algorithm for Geoscientific Modelling.
22. XIE, Y., CHEN, T., LEI, M., YANG, J., GUO, Q., SONG, B. & ZHOU, X. (2011): Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere* 82 (2011), 468-476.
23. MCCOY, J. & JOHNSTON, K. (2001-2002): Using ArcGis Spatial Analyst. GIS by ESRI.

24. MILETIĆ P. & BAČANI, A. (1999): EGPV: Balance Development. Book 4, Part 4, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb.
25. MITAS, L. & MITASOVA, H. (1999): Spatial interpolation, Chapter 34, 481-492.
26. NAKIĆ, Z., HORVAT, S. & BAČANI, A. (2005): Statistical Indicators of Groundwater Geochemical Characteristics in a Quaternary Aquifer from the Mala Mlaka Well Field Catchment Area (Zagreb, Croatia). *Geologia Croatica*, 58/1, 87-99.
27. BASCH, O. (1981): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Ivanić Grad L33-28. Geološki zavod Zagreb (1976), Sav. geol. zavod, Beograd.
29. NAKIĆ, Z., RUŽIČIĆ, S., POSAVEC, K., MILEUSNIĆ, M., PARLOV, J., BAČANI, A. & DURN, G. (2013): Conceptual model for groundwater status and risk assessment – case study of the Zagreb aquifer system. *Geologia Croatica*, 66/1, 55-76.
30. POSAVEC, K. (2006): Identification and prediction of minimum groundwater levels of Zagreb alluvial aquifer using recession curve models. – Unpubl. Dissertation, University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, 89 p.
31. VELIĆ J. & DURN, G. (1993): Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases During Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia.– *Geol. Croat.*, 46/1, 71–90
32. PRELOGOVIĆ, E. & VELIĆ, J. (1988). Quaternary tectonic activity in the western part of the Drava depression. *Geol. vjesnik*, Zagreb, 41, 237-253 (in Croatian with English abstract).
33. ŠIKIĆ, K., BASCH, D. & ŠIMUNIĆ, A. (1979): Osnovna geološka karta SFR J 1:100.000. Tumačza list Zagreb, l 38–80 [Basic Geological Map of SFRY 1:100 000, Geology of the Zagreb sheet – in Croatian]. – Institutza geološka istraživanja, Zagreb (1972), Savezni geološki zavod, Beograd, 81 p.
34. SOLLITTO, D., ROMIĆ, M., CASTRIGNANO, A., ROMIĆ, D. & BAKIĆ, H. (2010): Assessing potentially toxic metal contamination in soils of the Zagreb region (Northwest Croatia) using multivariate geostatistics.– *Catena* 80, 182–194.  
doi:10.1016/j.catena.2009.11.005.

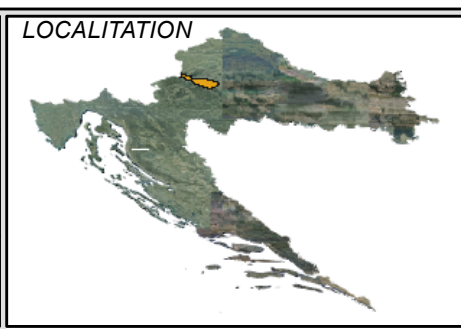


35. URUMOVID, K. & MIHELČID, D. (2000): Groundwater of the Sava River aquifer. Hydrology and Water resources of the River Sava, Book of Abstracts, Round table, Slavonski Brod.
36. Using ArcGis Geostatistical Analyst (2001). GIS by ESRI.
37. VELIĆ, J. & SAFTIĆ, B. (1991): Subsurface Spreading and Facies Characteristics of Middle Pleistocene Deposits between Zaprešid and Samobor. Geološki vjesnik, 44, 69–82.
38. VELIĆ J. & SAFTIĆ, B. (1996): Dubinskogeološki odnosi područja smetlišta “Jakuševac” – čimbenik sanacije [Deep geological relationship of city landfill “Jakuševac” - recovery factor – in Croatian] Waste management, IV. International symposium, Zagreb, 197–205.
39. VELIĆ, J., SAFTIĆ, B. & MALVIĆ, T. (1999): Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the “Jakuševac” Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia). Geologia Croatica, vol. 52, no. 2, p. 119–130.
40. VLAHOVIĆ, T., BAČANI, A., POSAVEC, K. (2008) Hydrogeochemical stratification of the unconfined Samobor aquifer (Zagreb, Croatia), Environ. Geol. Vol. 57, No. 8: 1707-1722.

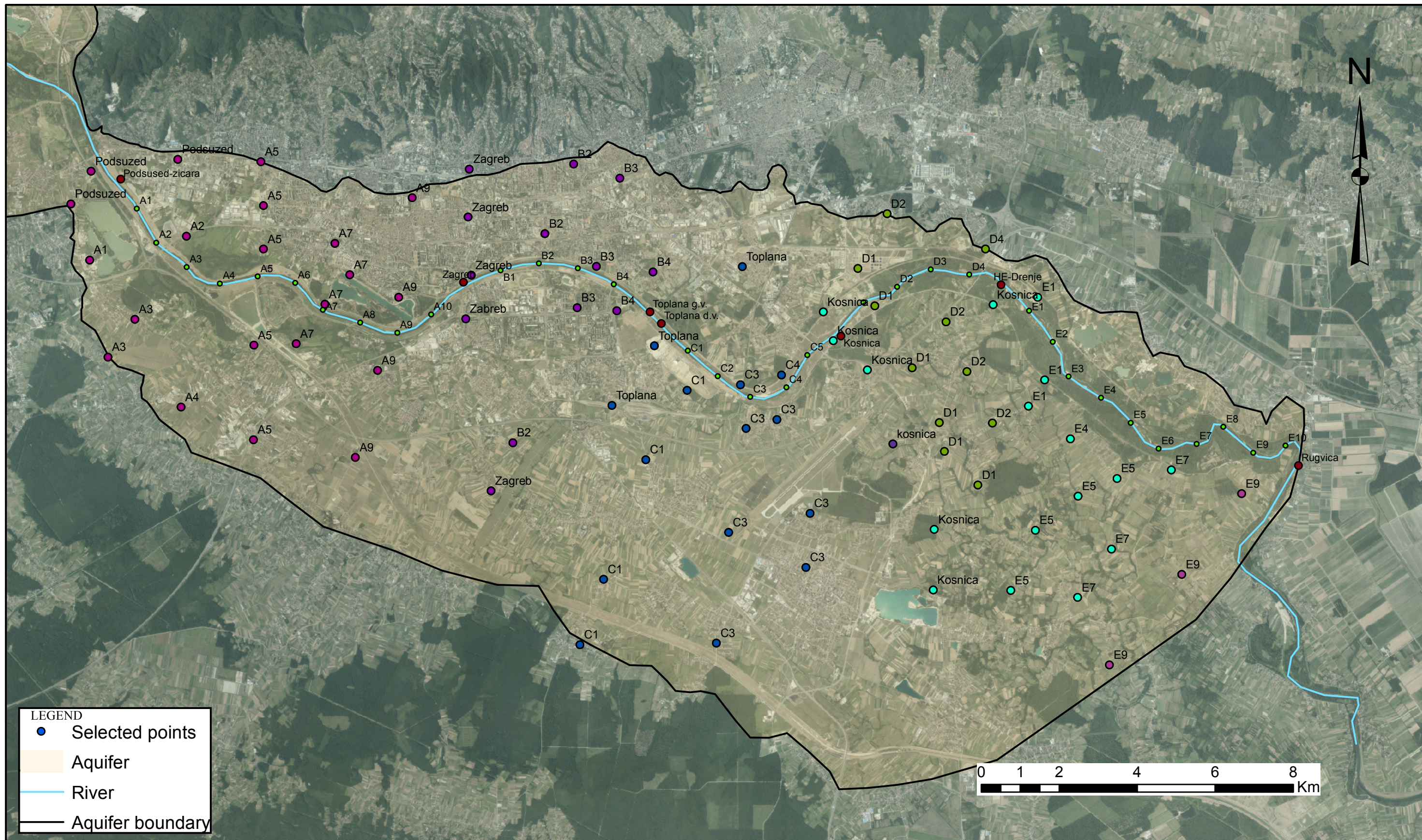
## **ANEJOS**


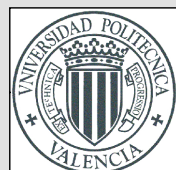




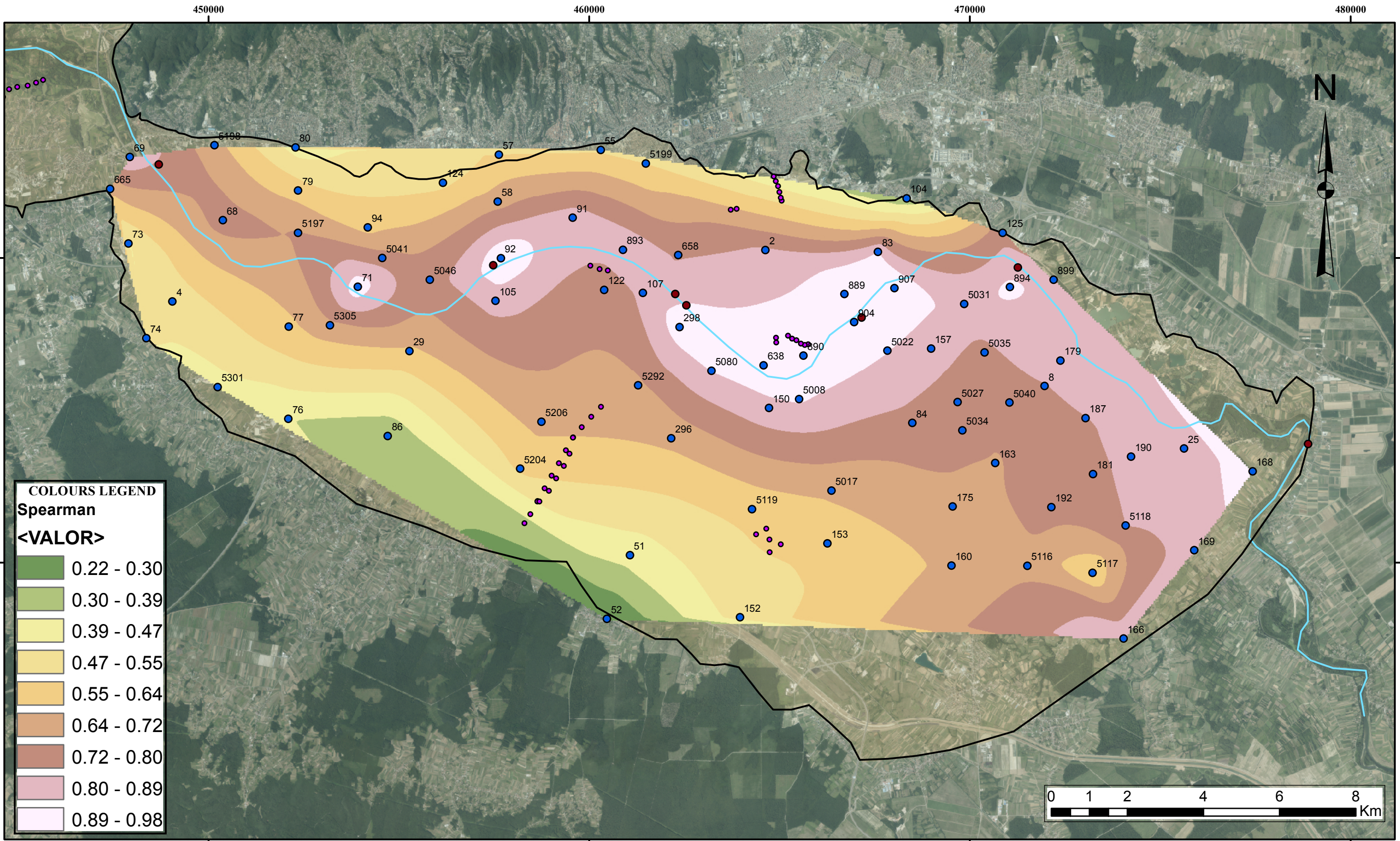
<p><b>LEGEND</b></p> <p>— River</p> <p>— Aquifer boundary</p> <p>● River original points</p>	AUTHOR: Miguel Soriano Juan
	RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.
	MAP TITLE: Selected points



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS



<p><b>LEGEND</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">—</span> River</li> <li><span style="color: red;">●</span> River original points</li> <li><span style="border-bottom: 1px solid black; width: 20px; display: inline-block;"></span> Aquifer boundary</li> </ul>	<p>AUTHOR: Miguel Soriano Juan</p> <hr/> <p>RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.</p> <hr/> <p>MAP TITLE: Correlation between river points and well points</p>	<p>LOCALITATION</p> 	<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA UNIVERSITY OF ZAGREB FINAL MASTER THESIS</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>
--	--	---	---



**LEGEND**

- Pumping well
- River original points
- Selected points
- River
- Aquifer boundary

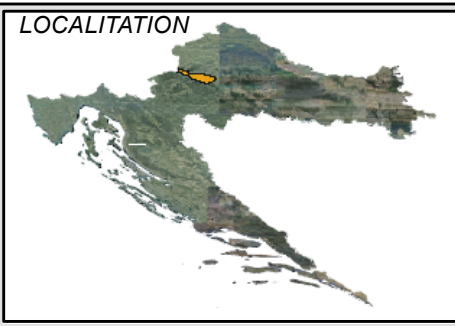
AUTHOR: Miguel Soriano Juan

---

RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.

---

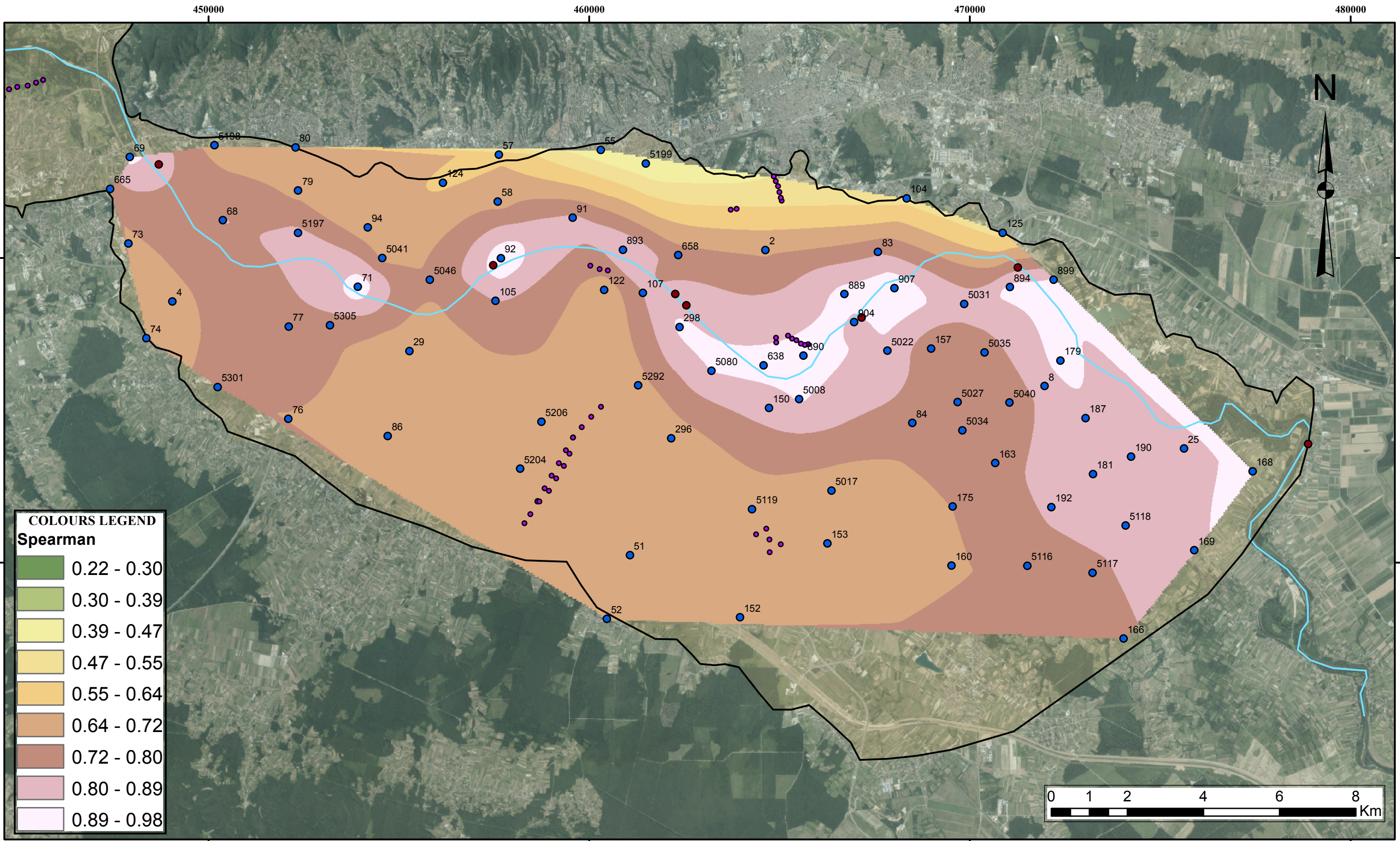
MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Spearman And Natural Neighbor method for full period



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS







**LEGEND**

- Pumping well
- River original points
- Selected points
- River
- Aquifer boundary

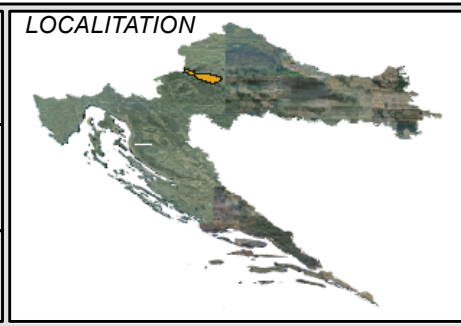
AUTHOR: Miguel Soriano Juan

---

RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.

---

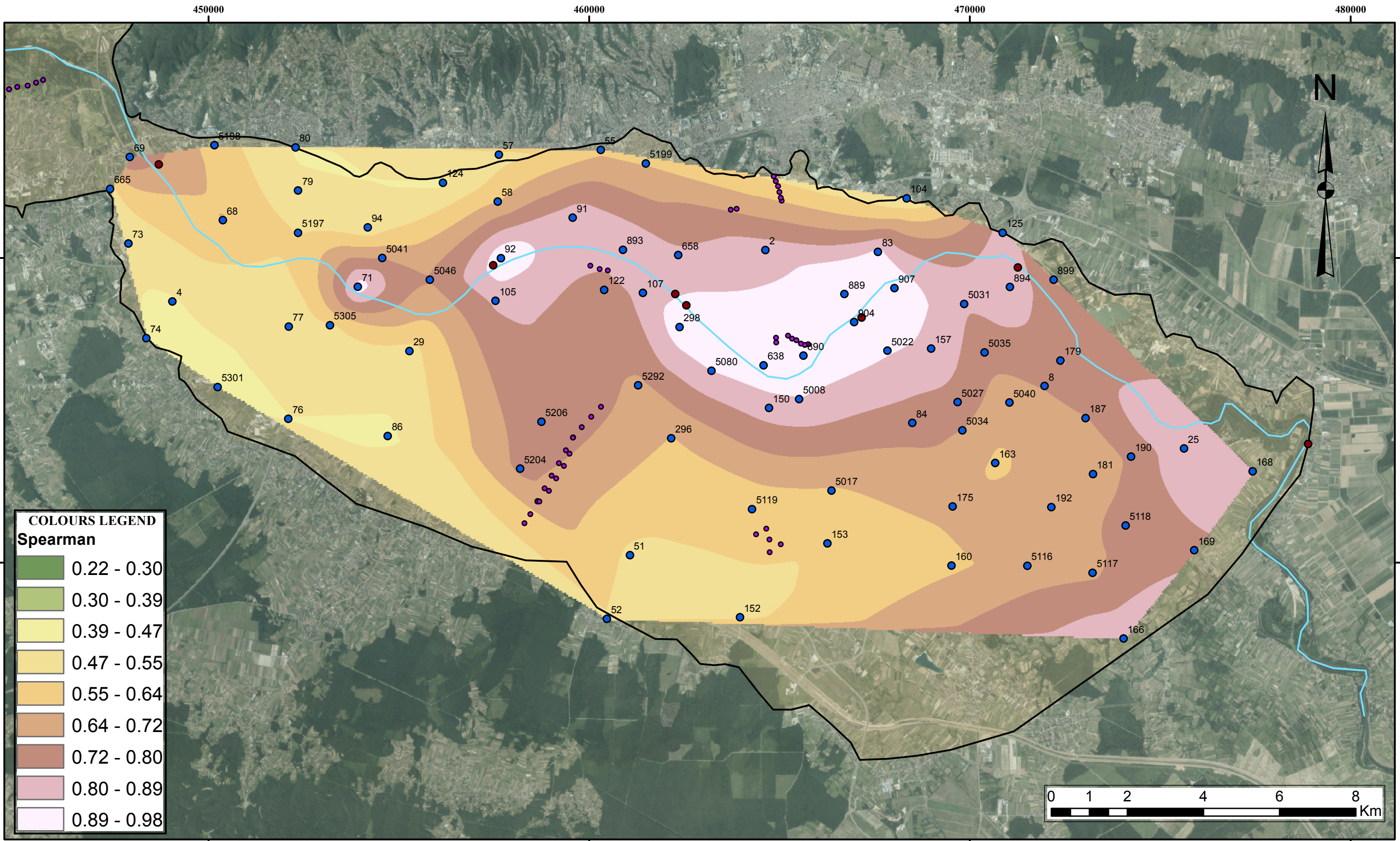
MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Spearman And Natural Neighbor weight method for period 1



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS







**COLOURS LEGEND**  
**Spearman**

	0.22 - 0.30
	0.30 - 0.39
	0.39 - 0.47
	0.47 - 0.55
	0.55 - 0.64
	0.64 - 0.72
	0.72 - 0.80
	0.80 - 0.89
	0.89 - 0.98

**LEGEND**

- Pumping well
- River original points
- Selected points
- River
- Aquifer boundary

AUTHOR: Miguel Soriano Juan

RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.

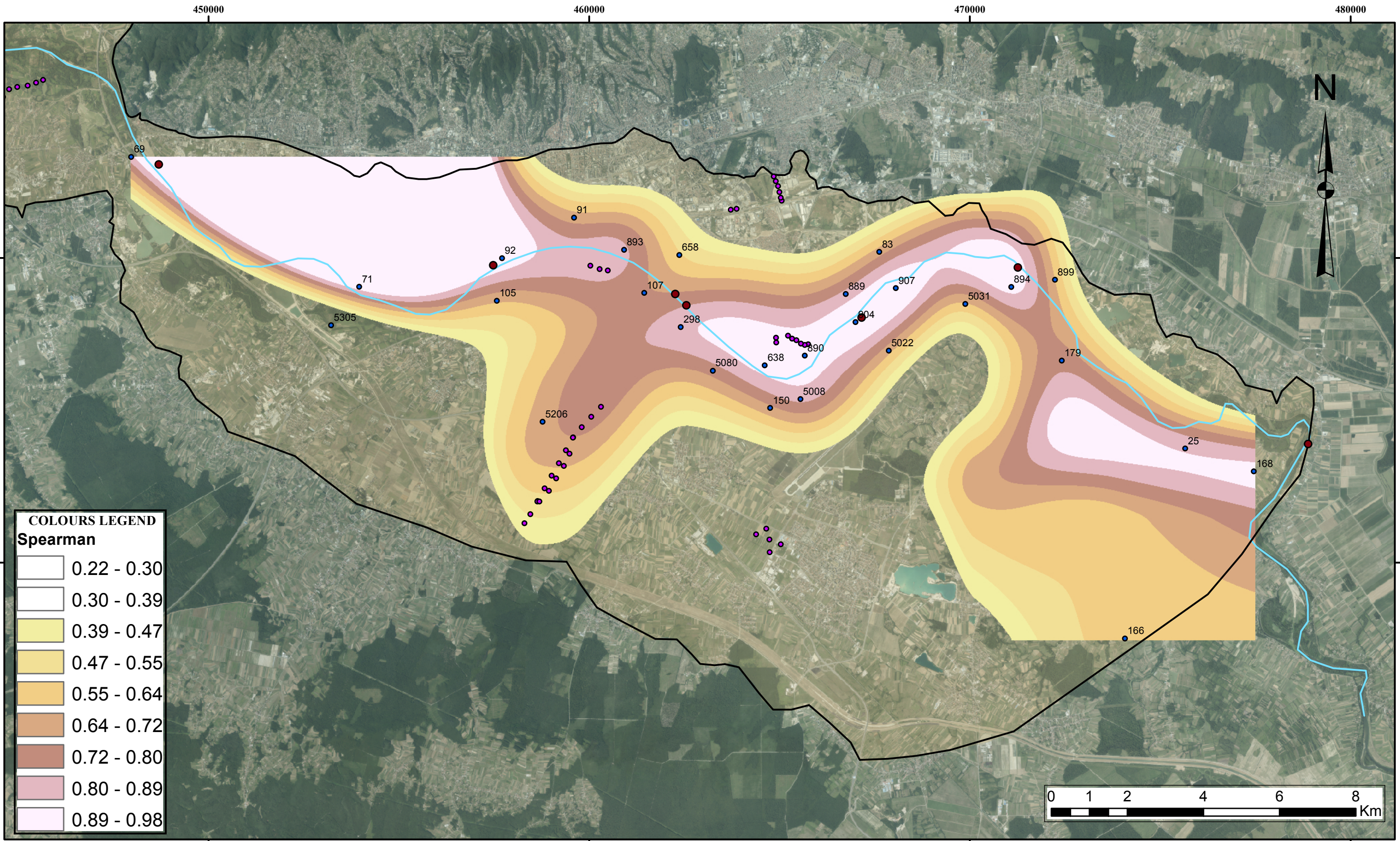
MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Spearman and Natural Neighbor weight method for period2

**LOCALITATION**



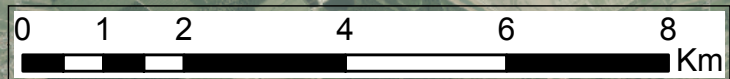
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS





**COLOURS LEGEND  
Spearman**

	0.22 - 0.30
	0.30 - 0.39
	0.39 - 0.47
	0.47 - 0.55
	0.55 - 0.64
	0.64 - 0.72
	0.72 - 0.80
	0.80 - 0.89
	0.89 - 0.98



**LEGEND**

- Pumping well
- River original points
- River
- Aquifer boundary

AUTHOR: Miguel Soriano Juan

RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.

MAP TITLE: Interpolation only with positive points with coefficient correlation Spearman and Natural Neighbor weight method for period 3.

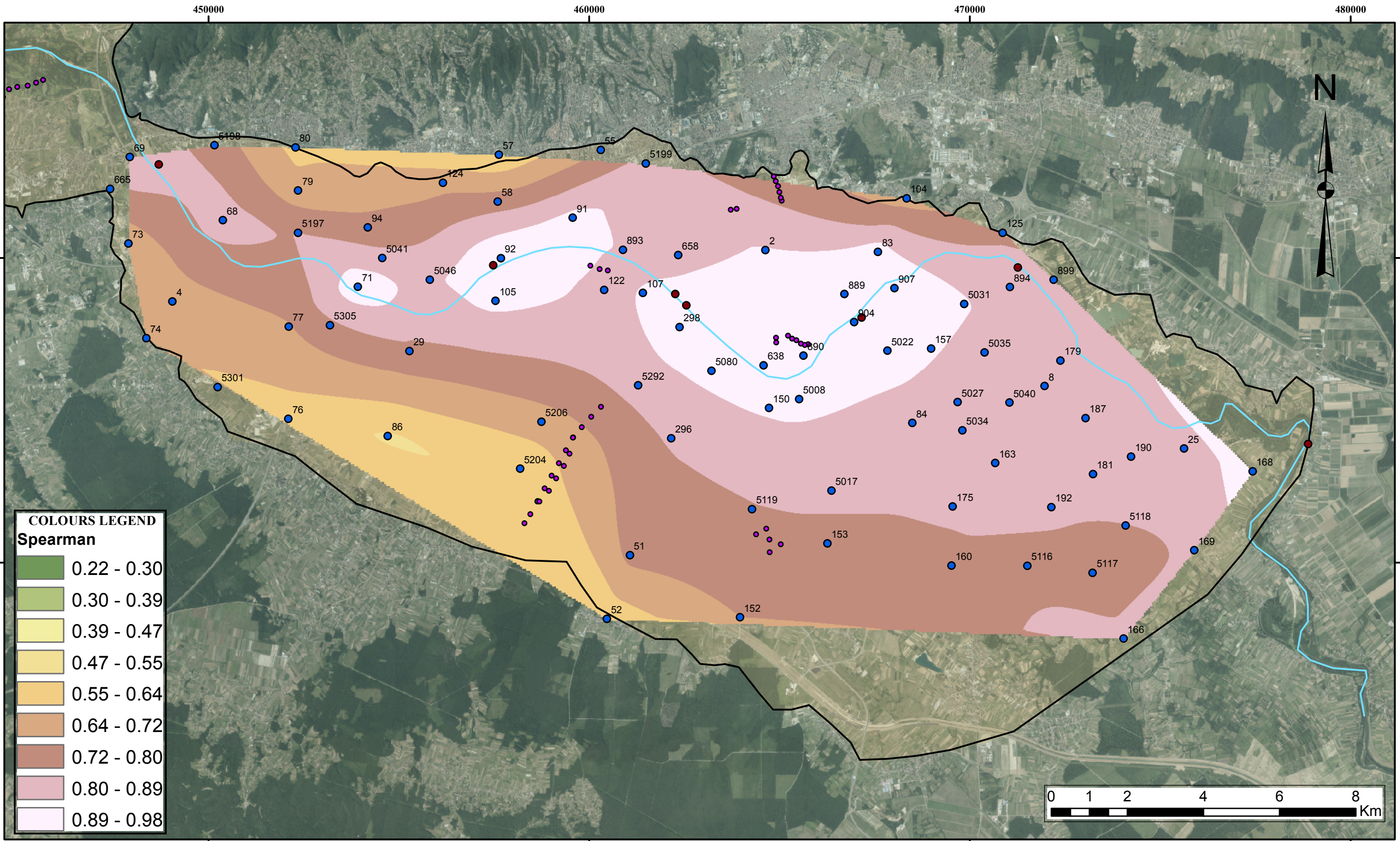
**LOCALITATION**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS







**COLOURS LEGEND**  
**Spearman**

Green	0.22 - 0.30
Light Green	0.30 - 0.39
Yellow	0.39 - 0.47
Orange	0.47 - 0.55
Light Brown	0.55 - 0.64
Dark Brown	0.64 - 0.72
Reddish Brown	0.72 - 0.80
Pink	0.80 - 0.89
White	0.89 - 0.98

- LEGEND**
- Pumping well
  - River original points
  - Selected points
  - River
  - Aquifer boundary

AUTHOR: Miguel Soriano Juan

---

RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.

---

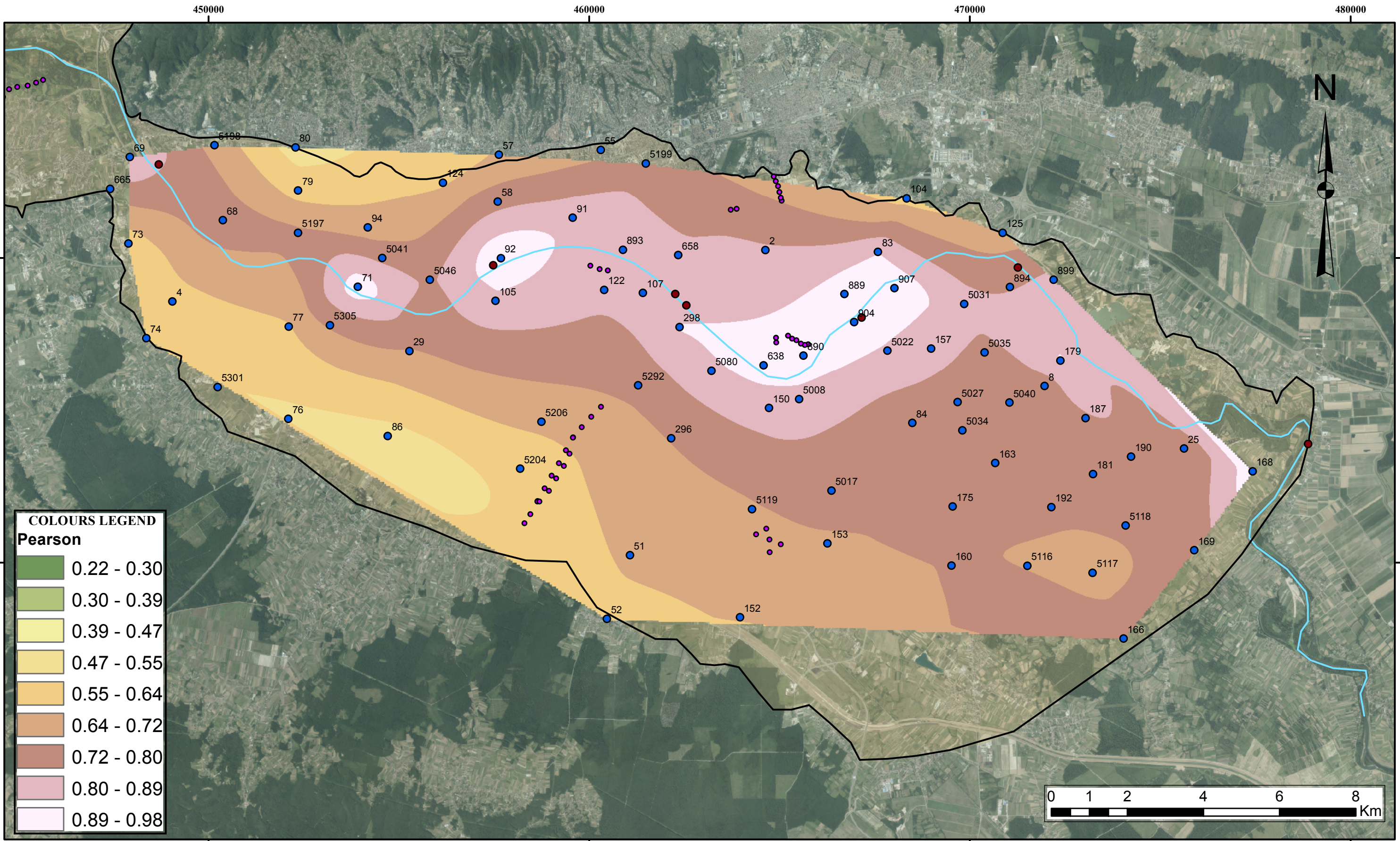
MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Spearman and Natural Neighbor weight method for periodo 1. Model 2



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS

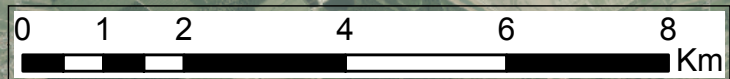


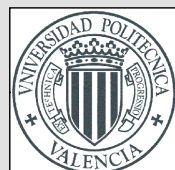

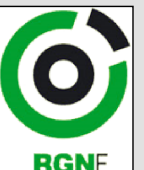


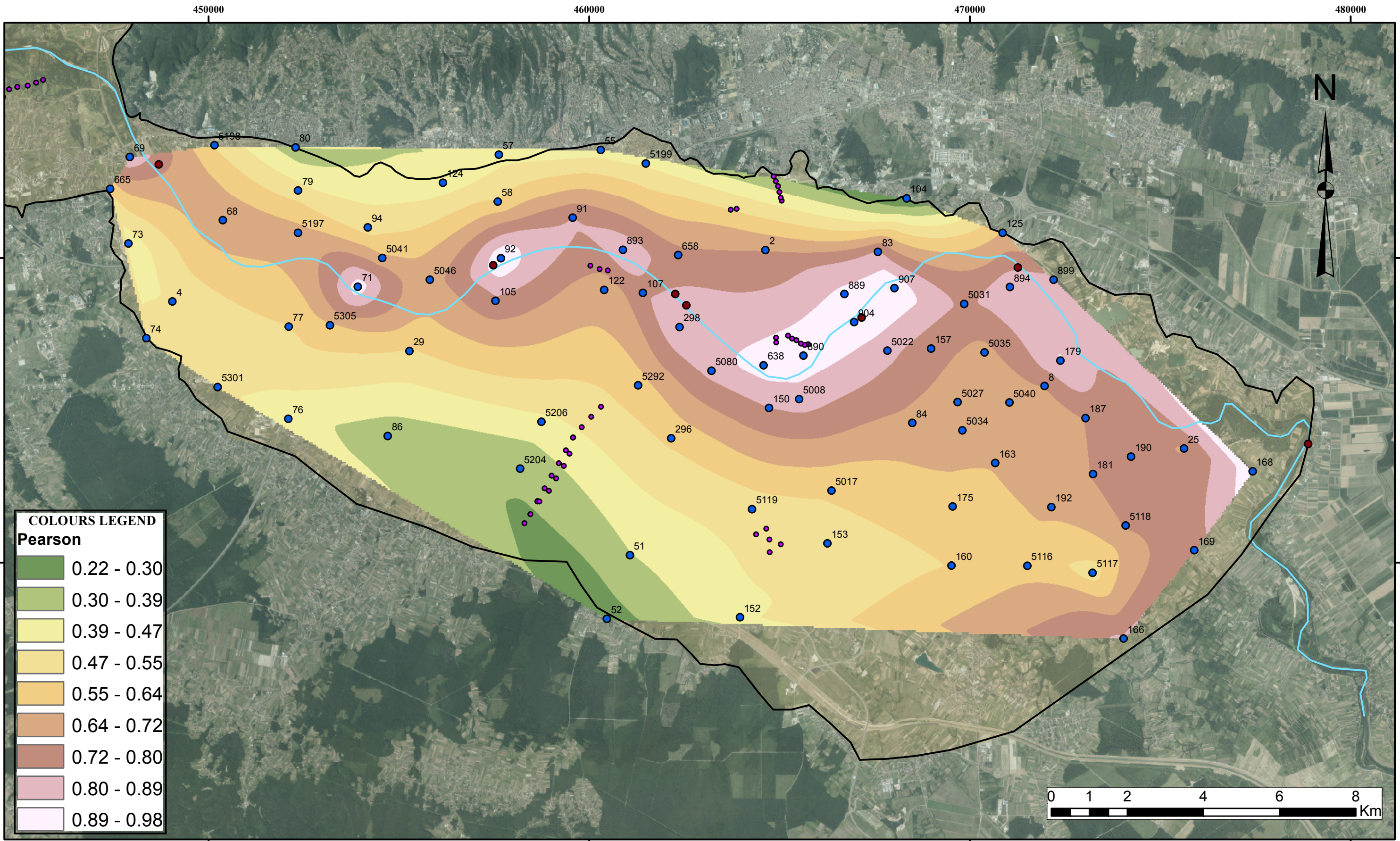


**COLOURS LEGEND**  
**Pearson**

0.22 - 0.30
0.30 - 0.39
0.39 - 0.47
0.47 - 0.55
0.55 - 0.64
0.64 - 0.72
0.72 - 0.80
0.80 - 0.89
0.89 - 0.98



<p><b>LEGEND</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: purple;">●</span> Pumping well</li> <li><span style="color: red;">●</span> River original points</li> <li><span style="color: blue;">●</span> Selected points</li> <li><span style="color: lightblue;">—</span> River</li> <li><span style="color: black;">—</span> Aquifer boundary</li> </ul>	<p>AUTHOR: Miguel Soriano Juan</p> <hr/> <p>RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.</p> <hr/> <p>MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Pearson and Natural Neighbor weight method for full period. Model 2</p>	<p>LOCALITATION</p>	<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA UNIVERSITY OF ZAGREB FINAL MASTER THESIS</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>
---	--	---------------------	---



**COLOURS LEGEND**  
**Pearson**

0.22 - 0.30
0.30 - 0.39
0.39 - 0.47
0.47 - 0.55
0.55 - 0.64
0.64 - 0.72
0.72 - 0.80
0.80 - 0.89
0.89 - 0.98

- LEGEND**
- Pumping well
  - River original points
  - Selected points
  - River
  - Aquifer boundary

AUTHOR: Miguel Soriano Juan

---

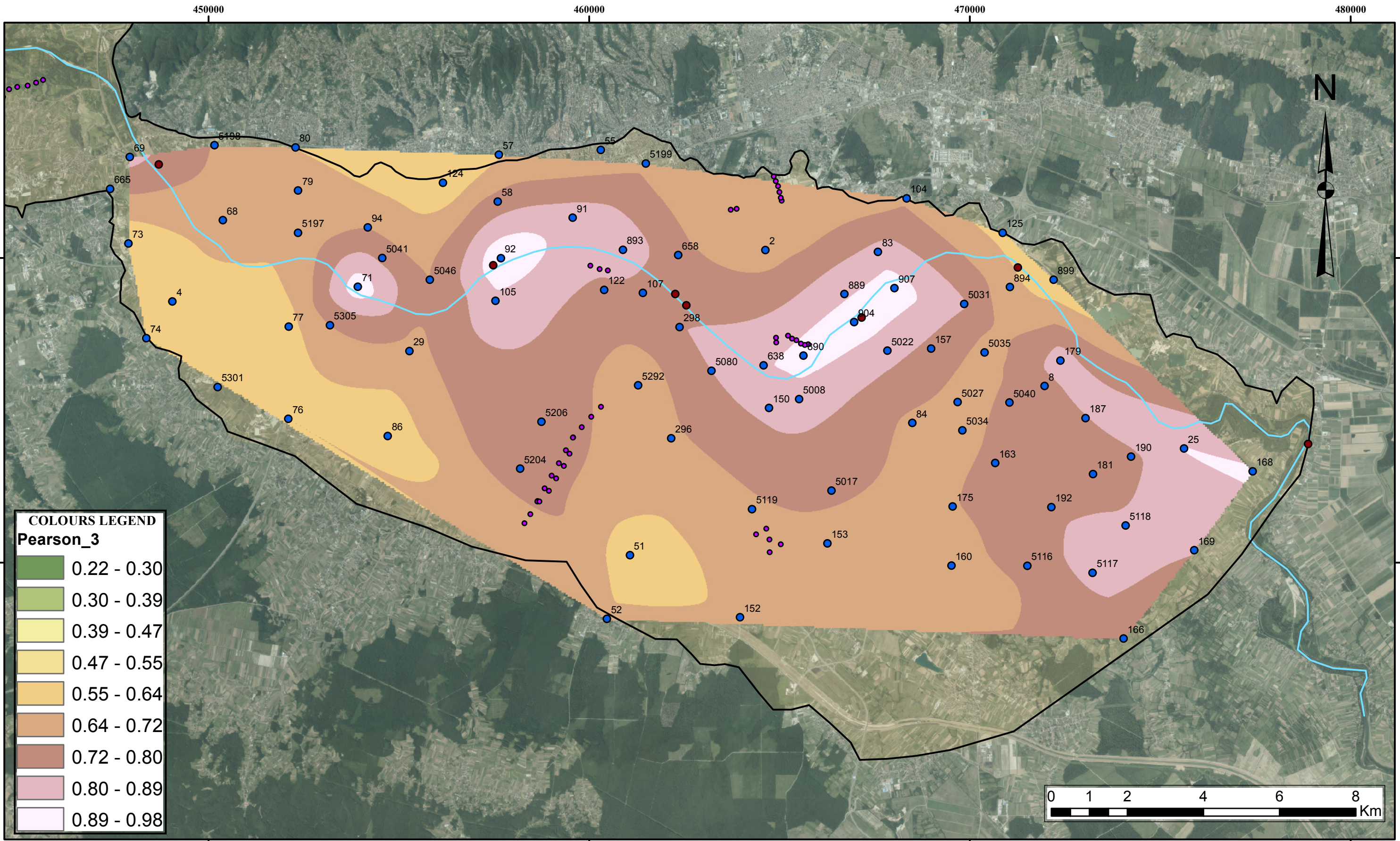
RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.

---

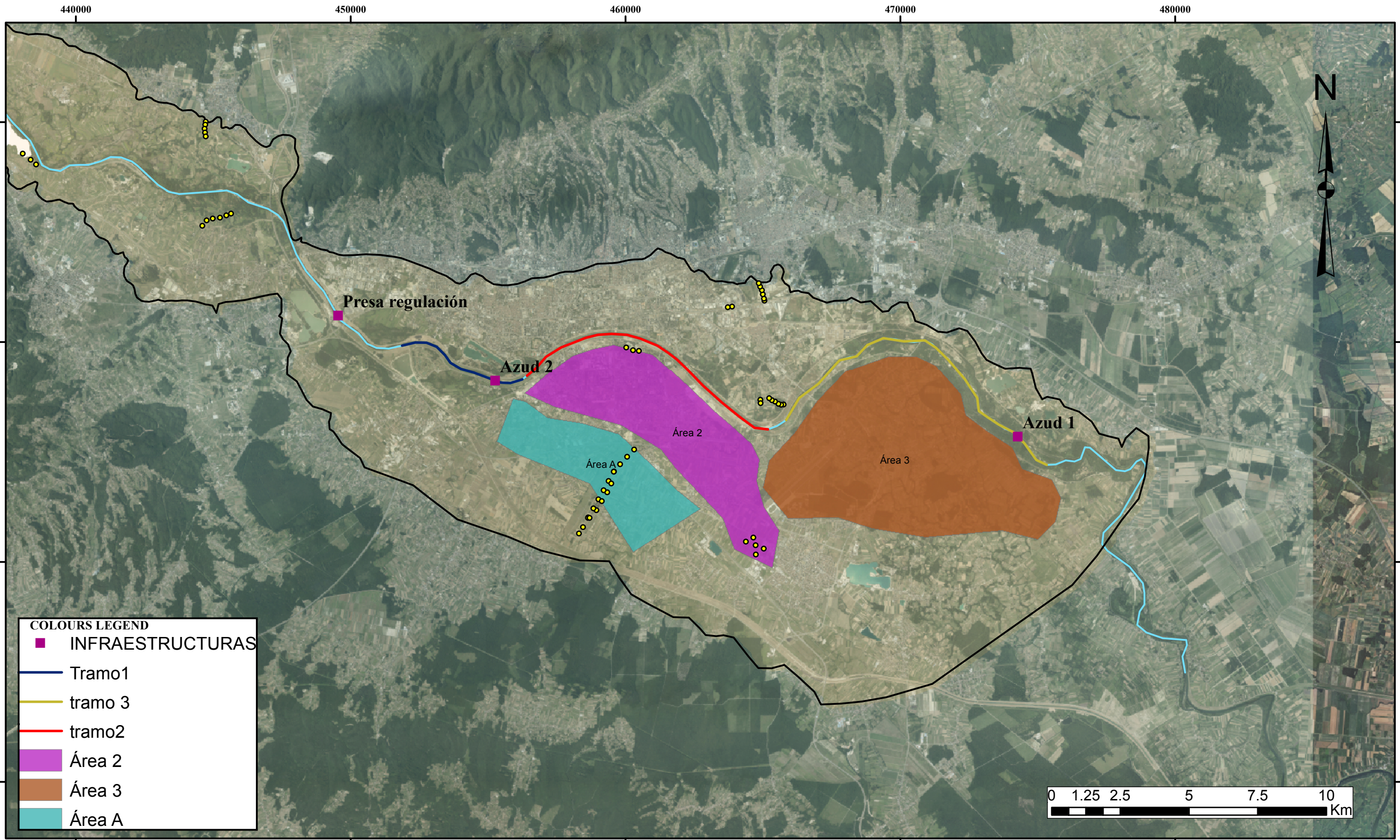
MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Pearson And Natural Neighbor method for full period



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS

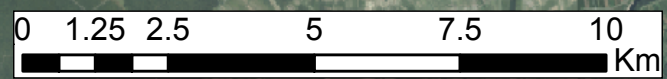


<p><b>LEGEND</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pumping well</li> <li>River original points</li> <li>Selected points</li> <li>River</li> <li>Aquifer boundary</li> </ul>	<p>AUTHOR: Miguel Soriano Juan</p>		<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA UNIVERSITY OF ZAGREB FINAL MASTER THESIS</p>
	<p>RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.</p>		
	<p>MAP TITLE: Interpolation with coefficient correlation Pearson and Natural Neighbor weight method for periodo3. Model 2</p>		

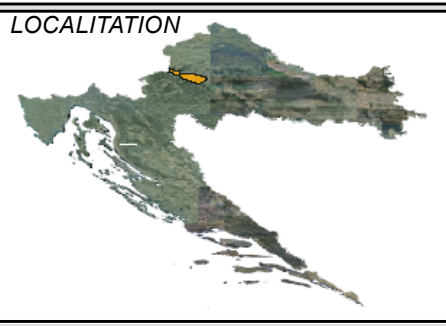


**COLOURS LEGEND**

- INFRAESTRUCTURAS
- Tramo1
- tramo 3
- tramo2
- Área 2
- Área 3
- Área A



<p><b>LEGEND</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">—</span> River</li> <li><span style="color: black;">—</span> Aquifer boundary</li> </ul>	<p>AUTHOR: Miguel Soriano Juan</p>
	<p>RESEARCH: Analysis and development of maps to improve the knowledge between river Sava and Zagreb aquifer system through statistical tools.</p>
	<p>MAP TITLE: Proposed of future infrastructure</p>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FINAL MASTER THESIS

RESULTADOS NUMÉRICOS

MODELO 1

Pearson

well name	x	y	Pearson n	P_value _P	Pearson _1	P_value_ P1	Pearson _2	P_value _2	Pearson _3	P_value _3	Pearson_3 _1	P_values_3 _1	Pearson_3 _2	P_values_3 _2
665	447419	5073812	0.57	3.38E-10	0.71	1.94E-05	0.69	1.36E-09	-0.33	0.207466	-0.26	0.541271	-0.17	0.307165
69	447939	5074649	0.89	5.89E-36	0.93	1.53E-12	0.85	6.71E-18	0.83	6.33E-05	0.65	0.08404	0.45	0.175258
5198	450161	5074955	0.55	1.71E-09	0.66	0.000128	0.73	5.15E-11	-0.24	0.374359	-0.38	0.347931	0.50	0.012381
73	447900	5072376	0.42	1.16E-05	0.70	3.45E-05	0.63	8.29E-08	-0.51	0.043797	-0.19	0.651143	-0.17	0.16022
68	450380	5072989	0.71	1.64E-17	0.79	4.63E-07	0.76	1.93E-12	0.28	0.285436	-0.18	0.664145	0.02	0.763333
4	449058	5070854	0.48	2.54E-07	0.67	8.41E-05	0.66	1.24E-08	-0.63	0.008628	-0.43	0.290332	-0.17	0.277939
74	448371	5069888	0.50	6.12E-08	0.71	2.2E-05	0.64	3.63E-08	-0.62	0.009693	-0.30	0.463203	-0.21	0.475727
5197	452357	5072656	0.67	4.82E-15	0.78	1.27E-06	0.72	8.47E-11	0.27	0.303734	-0.18	0.674993	0.17	0.921648
77	452112	5070194	0.55	1.28E-09	0.76	2.31E-06	0.66	1.11E-08	-0.28	0.29087	0.05	0.91163	-0.40	0.042555
79	452357	5073770	0.51	2.82E-08	0.65	0.000206	0.62	1.7E-07	-0.28	0.29087	0.05	0.91163	-0.40	0.042555
80	452290	5074897	0.33	0.000571	0.60	0.000729	0.57	1.78E-06	-0.79	0.000276	-0.49	0.21812	-0.61	0.57874
5301	450242	5068606	0.49	1.22E-07	0.73	1.25E-05	0.64	4.37E-08	-0.66	0.005013	-0.27	0.516804	-0.60	0.00733
76	452101	5067772	0.42	7.74E-06	0.70	2.99E-05	0.61	2E-07	-0.66	0.005334	-0.35	0.390703	-0.38	0.066195
71	453929	5071242	0.95	4.12E-52	0.97	7.54E-17	0.93	1.11E-26	0.95	2.12E-08	0.92	0.001021	0.64	0.061103
94	454186	5072800	0.51	2.63E-08	0.63	0.000356	0.68	1.74E-09	-0.43	0.094367	-0.43	0.283699	-0.17	0.460478

5305	45319 4	50702 30	0.62	2.49E- 12	0.73	9.15E-06	0.70	3.95E- 10	-0.01	0.96872	-0.22	0.593244	-0.14	0.516586
5041	45456 9	50719 97	0.66	3.65E- 14	0.65	0.000171	0.78	2.63E- 13	0.13	0.63117 3	-0.30	0.463805	0.02	0.800466
5046	45582 0	50714 22	0.68	1.43E- 15	0.70	3.06E-05	0.78	1.87E- 13	0.19	0.47641 1	-0.28	0.500071	0.02	0.857064
29	45528 2	50695 51	0.54	2.46E- 09	0.62	0.000415	0.71	1.64E- 10	-0.20	0.45396 9	-0.42	0.299167	-0.13	0.612389
86	45471 2	50673 20	0.34	0.00046	0.68	5.88E-05	0.59	6.84E- 07	-0.74	0.00101 6	-0.39	0.337852	-0.33	0.011153
124	45616 5	50739 71	0.43	5.28E- 06	0.63	0.000288	0.64	3.29E- 08	-0.70	0.00253 1	-0.39	0.342041	-0.24	0.071716
105	45754 3	50708 69	0.78	1.31E- 22	0.79	6.5E-07	0.83	1.47E- 16	0.59	0.01613 7	0.11	0.802061	0.18	0.669205
92	45768 4	50719 89	0.97	3.81E- 67	0.98	3.2E-20	0.96	8.6E-34	0.97	4.67E- 10	0.96	0.000174	0.85	0.008053
58	45760 0	50734 77	0.56	7.87E- 10	0.64	0.00024	0.72	9.16E- 11	-0.34	0.19996 2	-0.40	0.330301	-0.29	0.486197
57	45763 1	50747 05	0.44	3.58E- 06	0.59	0.001054	0.67	6.54E- 09	-0.75	0.00082 9	-0.41	0.307724	-0.66	0.075557
5204	45818 8	50664 63	0.31	0.00158 1	0.63	0.000314	0.26	0.04418 3	-0.75	0.00082 9	-0.41	0.307724	-0.66	0.075557
91	45957 1	50730 53	0.80	9.03E- 25	0.82	8.5E-08	0.85	5.91E- 18	0.63	0.00936 9	0.15	0.717905	0.23	0.578505
5206	45874 7	50676 93	0.45	1.63E- 06	0.63	0.000368	0.43	0.00055 5	0.63	0.00936 9	0.15	0.717905	0.23	0.578505
55	46030 6	50748 35	0.43	4.4E-06	0.43	0.021606	0.71	2.51E- 10	-0.75	0.00087 5	-0.47	0.244826	-0.61	0.104986
893	46088 8	50722 11	0.88	2.63E- 34	0.88	5.79E-10	0.85	5.03E- 18	0.88	7.46E- 06	0.80	0.017881	0.29	0.487295
122	46039 8	50711 56	0.65	6.43E- 14	0.65	0.000208	0.77	3.75E- 13	0.25	0.34802 9	-0.38	0.358945	-0.07	0.870365
5199	46149 2	50744 75	0.46	9.84E- 07	0.49	0.008331	0.70	4.26E- 10	-0.65	0.00647 2	-0.45	0.266628	-0.50	0.20695
107	46141 5	50710 77	0.79	3.16E- 23	0.80	2.67E-07	0.81	2.87E- 15	0.67	0.00488	0.17	0.685834	0.23	0.589579
658	46233 9	50720 70	0.75	1.22E- 19	0.75	4.41E-06	0.80	9.96E- 15	0.48	0.05889 2	-0.13	0.758416	0.08	0.855459

298	46237 6	50701 81	0.89	1.77E- 36	0.89	2.97E-10	0.93	9.79E- 28	0.80	0.00	0.61	0.10905	0.46	0.251294
2	46463 2	50722 06	0.72	1.02E- 17	0.65	1.63E-04	0.86	5.74E- 19	0.21	0.44	-0.32	0.446143	-0.12	0.776974
5292	46129 1	50686 50	0.60	2.56E- 11	0.64	2.32E-04	0.82	2.22E- 15	-0.19	0.49	-0.41	0.318739	-0.14	0.73726
5080	46321 6	50690 36	0.83	5.67E- 28	0.84	2.20E-08	0.89	7.33E- 22	0.74	0.00	0.48	0.226458	0.31	0.461903
296	46215 7	50672 59	0.57	3.00E- 10	0.65	1.66E-04	0.79	4.45E- 14	-0.32	0.23	-0.41	0.317004	-0.05	0.90669
51	46107 5	50641 95	0.38	5.48E- 05	0.63	3.35E-04	0.71	1.41E- 10	-0.70	0.00	-0.39	0.344874	-0.56	0.14901
52	46047 0	50625 19	0.26	7.17E- 03	0.67	8.36E-05	0.66	1.10E- 08	-0.66	0.01	-0.12	0.782015	0.11	0.793971
638	46458 3	50691 79	0.93	8.58E- 47	0.92	2.19E-12	0.95	8.03E- 32	0.88	0.00	0.75	0.033502	0.60	0.119505
150	46472 6	50680 59	0.80	1.43E- 24	0.82	8.75E-08	0.87	1.82E- 19	0.63	0.01	0.18	0.675862	0.35	0.394039
5119	46428 2	50654 00	0.51	4.36E- 08	0.65	1.97E-04	0.76	3.17E- 12	-0.64	0.01	-0.46	0.246203	-0.42	0.305001
152	46396 4	50625 60	0.45	1.39E- 06	0.66	1.24E-04	0.71	2.64E- 10	-0.69	0.00	-0.54	0.167692	-0.17	0.683991
5008	46551 9	50682 88	0.85	5.95E- 30	0.87	1.50E-09	0.89	2.14E- 21	0.74	0.00	0.38	0.349736	0.44	0.272977
5017	46636 7	50658 87	0.57	3.24E- 10	0.64	2.24E-04	0.78	3.32E- 13	-0.47	0.07	-0.44	0.277755	-0.30	0.470982
153	46626 0	50645 01	0.51	4.29E- 08	0.65	1.83E-04	0.75	4.78E- 12	-0.68	0.00	-0.43	0.284576	-0.51	0.192703
890	46563 3	50694 30	0.94	1.38E- 50	0.92	2.67E-12	0.96	4.55E- 33	0.93	0.00	0.89	0.003254	0.64	0.086881
904	46696 4	50703 11	0.96	5.77E- 58	0.94	3.17E-13	0.97	2.54E- 37	0.94	4.05E- 08	0.92	0.001086	0.82	0.012045
5022	46783 9	50695 60	0.83	2.51E- 27	0.83	5.8E-08	0.89	9.12E- 22	0.58	0.01968 3	0.10	0.812759	0.22	0.596784
84	46848 9	50676 63	0.69	5.33E- 16	0.71	2.51E-05	0.83	1.13E- 16	-0.09	0.72761 9	-0.36	0.387108	-0.29	0.489786
889	46670 7	50710 47	0.91	5.09E- 41	0.89	2.61E-10	0.94	1.34E- 28	0.84	5.37E- 05	0.73	0.040759	0.42	0.300675



175	46955 0	50654 72	0.61	9.84E- 12	0.70	2.97E-05	0.79	6.61E- 14	-0.50	0.05108	-0.34	0.415894	-0.47	0.237488
160	46952 3	50639 21	0.56	8.64E- 10	0.70	3.69E-05	0.76	1.43E- 12	-0.62	0.01002 2	-0.31	0.462281	-0.61	0.10735
83	46759 0	50721 58	0.83	4.91E- 27	0.79	4.8E-07	0.90	9.07E- 23	0.56	0.02458 2	0.00	0.999875	0.17	0.683737
907	46802 4	50712 02	0.96	8.72E- 61	0.97	4.55E-18	0.95	2.72E- 31	0.94	5.53E- 08	0.91	0.00182	0.83	0.011542
157	46898 3	50696 14	0.75	1.2E-19	0.71	1.94E-05	0.87	1.24E- 19	0.27	0.31418 3	-0.35	0.400138	-0.05	0.899655
5027	46968 2	50682 10	0.69	8.52E- 16	0.69	5.35E-05	0.84	5.1E-17	-0.11	0.67176 5	-0.38	0.356269	-0.26	0.527099
5034	46980 8	50674 70	0.67	1.15E- 14	0.70	3.38E-05	0.83	4.78E- 16	-0.23	0.38279 4	-0.39	0.34066	-0.01	0.980551
163	47067 0	50666 10	0.68	2E-15	0.77	1.87E-06	0.80	1.03E- 14	-0.13	0.63146 6	-0.18	0.674022	-0.40	0.326058
163	47067 0	50666 10	0.66	2.06E- 14	0.79	6.35E-07	0.81	6.22E- 15	-0.03	0.91318 6	-0.10	0.812051	-0.03	0.939336
163	47067 0	50666 10	0.64	2.39E- 13	0.76	2.37E-06	0.76	1.26E- 12	-0.09	0.73528 7	-0.18	0.676271	-0.21	0.625686
104	46834 0	50735 60	0.22	0.02659 3	0.52	0.004769	0.61	2.57E- 07	-0.73	0.00132 2	-0.10	0.819862	-0.88	0.003625
5031	46985 3	50707 91	0.79	5.04E- 23	0.80	2.92E-07	0.85	3.61E- 18	0.56	0.02392	0.07	0.868998	0.25	0.553635
5035	47039 0	50695 18	0.69	5.52E- 16	0.70	3.08E-05	0.82	1.05E- 15	0.18	0.50009	-0.20	0.628828	0.04	0.916112
5040	47104 1	50681 99	0.65	7.96E- 14	0.71	2.48E-05	0.79	1.13E- 13	-0.07	0.80225 5	-0.33	0.431529	0.30	0.472704
125	47086 2	50726 57	0.65	1.45E- 13	0.45	0.01539	0.83	3.98E- 16	0.25	0.34103 6	-0.09	0.831033	-0.05	0.903971
894	47105 7	50712 33	0.88	3.56E- 35	0.87	1.34E-09	0.90	1.55E- 22	0.85	2.9E-05	0.64	0.087393	0.56	0.146668
899	47220 4	50714 24	0.83	3.13E- 27	0.91	1.22E-11	0.85	4.89E- 18	0.57	0.02224 5	0.15	0.724246	0.16	0.696925
179	47238 1	50693 02	0.90	1.47E- 37	0.86	5.39E-09	0.90	5.39E- 23	0.86	1.57E- 05	0.75	0.03221	0.45	0.264899
8	47196 6	50686 34	0.72	4.37E- 18	0.80	2.68E-07	0.85	4.98E- 18	0.14	0.59958 6	-0.12	0.77324	0.09	0.826798

187	473040	5067793	0.72	5.92E-18	0.82	1.1E-07	0.85	7.16E-18	-0.08	0.766277	-0.31	0.455018	0.07	0.860771
190	474237	5066777	0.75	1.04E-19	0.83	4.12E-08	0.86	1.33E-18	0.04	0.873154	-0.24	0.564448	0.04	0.919779
181	473236	5066322	0.72	3.33E-18	0.84	2.19E-08	0.84	5.48E-17	0.02	0.951955	-0.09	0.823043	-0.03	0.950081
192	472144	5065452	0.65	6.49E-14	0.78	9.42E-07	0.81	6.12E-15	-0.39	0.139956	-0.28	0.508847	-0.22	0.59926
5116	471511	5063912	0.60	1.15E-11	0.71	2.69E-05	0.82	1.12E-15	-0.38	0.14314	-0.34	0.413501	-0.03	0.94298
25	475626	5066995	0.72	1.51E-17	0.45	0.016702	0.81	2.29E-15	0.89	3.79E-06	0.94	0.0006	0.21	0.625537
5118	474092	5064970	0.73	2.06E-18	0.82	6.84E-08	0.83	4.09E-16	-0.10	0.710779	-0.16	0.704696	-0.11	0.787592
5117	473227	5063729	0.51	3.56E-08	0.79	7.27E-07	0.68	1.89E-09	-0.11	0.672547	-0.16	0.711779	-0.10	0.816881
168	477428	5066393	0.94	2.6E-49	0.97	4.8E-18	0.94	9.2E-29	0.90	2.11E-06	0.70	0.051621	0.68	0.063962
169	475895	5064322	0.77	9.65E-22	0.82	7.44E-08	0.86	7.08E-19	0.36	0.171739	0.13	0.752322	0.00	0.9945
166	474042	5062001	0.82	2.66E-26	0.80	3.32E-07	0.89	6.49E-22	0.58	0.018612	0.20	0.640666	0.03	0.94258

well name	x	y	Spearman	Spearman_1	Spearman_2	Spearman_3	P_values_S3	Spearman_3_1	Spearman_3_2
665	447419	5073812	0.653098	0.75047	0.520252	-0.30355	0.253069	-0.38095	-0.166666667
69	447939	5074649	0.881319	0.918238	0.806084	0.855882	2.34E-05	0.738095	0.452380952
5198	450161	5074955	0.668005	0.680336	0.595541	-0.30588	0.249254	-0.42857	0.5
73	447900	5072376	0.466886	0.701176	0.482669	-0.54943	0.027489	-0.42857	-0.166666667
68	450380	5072989	0.760439	0.804879	0.641526	0.364706	0.164868	-0.2381	0.023809524
4	449058	5070854	0.491954	0.694452	0.463691	-0.55882	0.024437	-0.42857	-0.166666667
74	448371	5069888	0.475127	0.694409	0.461295	-0.64279	0.007239	-0.42857	-0.211857853
5197	452357	5072656	0.724048	0.820471	0.549398	0.364706	0.164868	-0.11905	0.166666667
77	452112	5070194	0.615661	0.786049	0.487546	-0.3386	0.199555	-0.08153	-0.403162105
79	452357	5073770	0.602622	0.691889	0.485101	-0.3386	0.199555	-0.08153	-0.403162105
80	452290	5074897	0.43658	0.692706	0.461524	-0.86001	1.94E-05	-0.52407	-0.612372436
5301	450242	5068606	0.440717	0.735501	0.460258	-0.83869	4.92E-05	-0.47619	-0.600751409
76	452101	5067772	0.392587	0.71538	0.469586	-0.70101	0.002483	-0.47619	-0.378753544
71	453929	5071242	0.947105	0.951488	0.936351	0.935294	1.07E-07	0.904762	0.642857143
94	454186	5072800	0.605658	0.658002	0.492567	-0.33092	0.210584	-0.47619	-0.166666667
5305	453194	5070230	0.693193	0.744618	0.537764	4.33E-05	0	-0.15883	-0.142857143
5041	454569	5071997	0.758507	0.69728	0.71983	0.25	0.350391	-0.35714	0.023809524
5046	455820	5071422	0.769576	0.733428	0.725804	0.294118	0.268847	-0.33333	0.023809524
29	455282	5069551	0.621002	0.635346	0.522668	-0.05736	0.832892	-0.5	-0.134396419
86	454712	5067320	0.31511	0.686638	0.452239	-0.83944	4.77E-05	-0.47619	-0.327326835
124	456165	5073971	0.537503	0.628187	0.462702	-0.77053	0.000478	-0.47619	-0.238095238
105	457543	5070869	0.836891	0.803975	0.819518	0.647059	0.006742	-0.02381	0.285714286
92	457684	5071989	0.971782	0.967159	0.968599	0.958824	4.83E-09	0.928571	0.761904762
58	457600	5073477	0.68155	0.681845	0.634593	-0.2123	0.429888	-0.47619	-0.166666667
57	457631	5074705	0.563063	0.622368	0.518737	-0.81286	0.000129	-0.47619	-0.281010694
5204	458188	5066463	0.570412	0.665572	0.743962	-0.81286	0.000129	-0.47619	-0.281010694
91	459571	5073053	0.85152	0.819067	0.859249	0.682353	0.003588	0.047619	0.285714286
5206	458747	5067693	0.663687	0.66146	0.800504	0.682353	0.003588	0.047619	0.285714286
55	460306	5074835	0.543015	0.305105	0.619184	-0.77348	0.00044	-0.47619	-0.238095238
893	460888	5072211	0.881405	0.893268	0.885628	0.815551	0.000118	0.626498	0.305446406
122	460398	5071156	0.731865	0.662978	0.759153	0.373529	0.154122	-0.38095	0.023809524

5199	461492	5074475	0.556362	0.404305	0.631139	-0.59412	0.015232	-0.47619	-0.166666667
107	461415	5071077	0.826617	0.808429	0.834034	0.732353	0.001255	0.190476	0.285714286
658	462339	5072070	0.794558	0.756851	0.817295	0.564706	0.022663	-0.11905	0.166666667
298	462376	5070181	0.93	0.91	0.95	0.86	0.00	0.62	0.60
2	464632	5072206	0.82	0.70	0.85	0.31	0.25	-0.50	0.17
5292	461291	5068650	0.70	0.69	0.70	-0.01	0.96	-0.50	0.17
5080	463216	5069036	0.89	0.89	0.89	0.76	0.00	0.40	0.38
296	462157	5067259	0.66	0.67	0.63	-0.16	0.56	-0.55	0.17
51	461075	5064195	0.42	0.69	0.54	-0.83	0.00	-0.48	-0.33
52	460470	5062519	0.22	0.69	0.55	-0.67	0.00	-0.06	0.25
638	464583	5069179	0.95	0.92	0.96	0.92	0.00	0.81	0.64
150	464726	5068059	0.86	0.84	0.85	0.70	0.00	0.05	0.38
5119	464282	5065400	0.58	0.67	0.58	-0.63	0.01	-0.48	-0.17
152	463964	5062560	0.51	0.67	0.53	-0.67	0.00	-0.54	-0.24
5008	465519	5068288	0.90	0.89	0.88	0.82	0.00	0.43	0.50
5017	466367	5065887	0.65	0.67	0.63	-0.38	0.15	-0.48	-0.14
153	466260	5064501	0.58	0.65	0.56	-0.68	0.00	-0.48	-0.17
890	465633	5069430	0.96	0.92	0.96	0.93	0.00	0.83	0.64
904	466964	5070311	0.965499	0.865307	0.982617	0.955882	7.76E-09	0.904762	0.857142857
5022	467839	5069560	0.887197	0.879074	0.891338	0.655882	0.005801	-0.02381	0.380952381
84	468489	5067663	0.774468	0.749318	0.7571	-0.04823	0.859229	-0.5	-0.142857143
889	466707	5071047	0.942457	0.923031	0.958158	0.838235	5.01E-05	0.642857	0.452380952
175	469550	5065472	0.691812	0.721141	0.654367	-0.45588	0.075945	-0.47619	-0.166666667
160	469523	5063921	0.651572	0.707689	0.623629	-0.68209	0.003606	-0.47619	-0.166666667
83	467590	5072158	0.889114	0.791404	0.914419	0.685294	0.003392	0.142857	0.380952381
907	468024	5071202	0.97527	0.969622	0.962273	0.955882	7.76E-09	0.904762	0.857142857
157	468983	5069614	0.830641	0.72722	0.863594	0.364706	0.164868	-0.33333	0.166666667
5027	469682	5068210	0.771552	0.737004	0.775434	-0.04797	0.85996	-0.5	-0.056954406
5034	469808	5067470	0.747139	0.730583	0.716114	-0.05588	0.837137	-0.42857	0.166666667
163	470670	5066610	0.741513	0.780515	0.692502	-0.16471	0.542148	-0.42857	-0.142857143
163	470670	5066610	0.759552	0.81544	0.673272	0.011765	0.965508	-0.09524	0.166666667
163	470670	5066610	0.71369	0.783929	0.619408	-0.10588	0.696334	-0.42857	0.023809524
104	468340	5073560	0.325013	0.524988	0.478395	-0.84807	3.32E-05	-0.07143	-0.967351878

5031	469853	5070791	0.845839	0.842165	0.807685	0.624759	0.009669	-0.02381	0.452380952
5035	470390	5069518	0.780348	0.755483	0.747995	0.318364	0.229464	-0.33333	0.244599795
5040	471041	5068199	0.731533	0.750829	0.653792	0.029412	0.913896	-0.5	0.452380952
125	470862	5072657	0.773782	0.52517	0.844267	0.297059	0.263863	-0.04762	0.023809524
894	471057	5071233	0.909875	0.916538	0.872015	0.914706	7.01E-07	0.738095	0.785714286
899	472204	5071424	0.831571	0.896004	0.71441	0.632353	0.008578	0.190476	0.428571429
179	472381	5069302	0.887779	0.917409	0.808134	0.770588	0.000477	0.738095	0.761904762
8	471966	5068634	0.795973	0.847019	0.730113	0.129412	0.632882	0.047619	0.333333333
187	473040	5067793	0.799713	0.860955	0.71739	0.045065	0.868376	-0.19048	0.095238095
190	474237	5066777	0.814334	0.87618	0.730452	0.202941	0.450961	-0.09524	0.095238095
181	473236	5066322	0.793006	0.875036	0.683362	0.129412	0.632882	0.071429	0.095238095
192	472144	5065452	0.75126	0.81897	0.689848	-0.23594	0.379019	-0.19048	0.095238095
5116	471511	5063912	0.699102	0.760889	0.664627	-0.20882	0.437659	-0.19048	0.166666667
25	475626	5066995	0.829201	0.056605	0.880148	0.873121	1.01E-05	0.863027	0.384371107
5118	474092	5064970	0.803326	0.830244	0.745199	-0.02353	0.931074	-0.02381	0.095238095
5117	473227	5063729	0.554854	0.788905	0.704025	-0.05	0.8541	-0.02381	0.095238095
168	477428	5066393	0.940768	0.977559	0.884895	0.907711	1.19E-06	0.690476	0.785714286
169	475895	5064322	0.824524	0.858167	0.779295	0.391176	0.134071	0.190476	0.071428571
166	474042	5062001	0.875072	0.790874	0.872962	0.570036	0.021144	0.190476	0.125299693

RESULTADO NUMÉRICO

MODELO 2

SPEARMAN

well name	x	y	Spearman	Spearman_1	Spearman_2	Spearman_3	P_values_S3	1	Spearman_3_1	Spearman_3_2	Days
69	447939	5074649	0.881319	0.918238	0.806084	0.855882	2.34E-05	1	0.738095	0.452381	0
5198	450161	5074955	0.767468	#N/A	#N/A	0.861895	1.77E-05	1	#N/A	#N/A	5
73	447900	5072376	0.666031	#N/A	#N/A	0.78685	0.000299	1	#N/A	#N/A	5
68	450380	5072989	0.846729	#N/A	#N/A	0.823529	8.84E-05	1	#N/A	#N/A	2
4	449058	5070854	0.672207	#N/A	#N/A	0.802941	0.000181	1	#N/A	#N/A	5
74	448371	5069888	0.655766	#N/A	#N/A	0.800088	0.000198	1	#N/A	#N/A	6
5197	452357	5072656	0.804431	#N/A	#N/A	0.776471	0.000404	1	#N/A	#N/A	2
77	452112	5070194	0.71276	#N/A	#N/A	0.888247	4.32E-06	0	#N/A	#N/A	5
79	452357	5073770	0.667222	0.691338	0.700791	0	1	1	0	0	0
80	452290	5074897	0.611513	#N/A	#N/A	0.677815	0.003909	1	#N/A	#N/A	8
76	452101	5067772	0.602127	#N/A	#N/A	0.826029	8.06E-05	1	#N/A	#N/A	6
71	453929	5071242	0.947105	0.951488	0.936351	0.935294	1.07E-07	1	0.904762	0.642857	0
94	454186	5072800	0.742857	#N/A	#N/A	0.920895	4.21E-07	1	#N/A	#N/A	5
5046	455820	5071422	0.874337	#N/A	#N/A	0.811765	0.000134	1	#N/A	#N/A	2
29	455282	5069551	0.783068	#N/A	#N/A	0.87508	9.09E-06	1	#N/A	#N/A	4
86	454712	5067320	0.541906	#N/A	#N/A	0.688249	0.003203	1	#N/A	#N/A	6
124	456165	5073971	0.694555	#N/A	#N/A	0.779487	0.000371	1	#N/A	#N/A	6
105	457543	5070869	0.908315	0.803975	0.819518	0.888235	4.33E-06	1	-0.02381	0.285714	1
92	457684	5071989	0.971782	0.967159	0.968599	0.958824	4.83E-09	1	0.928571	0.761905	0
57	457631	5074705	0.563063	0.622368	0.518737	0.794999	0.000233	1	-0.47619	-0.28101	8
5204	458188	5066463	0.564285	0.663383	0.236318	0.783217	0.000333	1	-0.83333	-0.4	8
91	459571	5073053	0.913093	0.819067	0.859249	0.914706	7.01E-07	1	0.047619	0.285714	1
893	460888	5072211	0.881405	0.893268	0.885628	0.815551	0.000118	1	0.626498	0.305446	0
122	460398	5071156	0.866699	0.662978	0.759153	0.844118	3.93E-05	1	-0.38095	0.02381	2
5199	461492	5074475	0.835453	0.404305	0.631139	0.844118	3.93E-05	1	-0.47619	-0.16667	6
658	462339	5072070	0.865752	0.756851	0.817295	0.838235	5.01E-05	1	-0.11905	0.166667	2

298	462376	5070181	0.934878	0.907386	0.948786	0.858824	2.05E-05	1	0.619048	0.595238	1
2	464632	5072206	0.890712	#N/A	#N/A	0.844118	3.93E-05	1	#N/A	#N/A	3
5292	461291	5068650	0.839066	#N/A	#N/A	0.823529	8.84E-05	1	#N/A	#N/A	4
296	462157	5067259	0.811064	#N/A	#N/A	0.838235	5.01E-05	1	#N/A	#N/A	5
51	461075	5064195	0.741973	#N/A	#N/A	0.811692	0.000135	1	#N/A	#N/A	9
52	460470	5062519	0.582314	#N/A	#N/A	-0.67031	0.00449	1	#N/A	#N/A	9
638	464583	5069179	0.953607	0.921182	0.956646	0.920588	4.32E-07	1	0.809524	0.642857	0
5119	464282	5065400	0.797276	#N/A	#N/A	0.9	2.05E-06	1	#N/A	#N/A	6
152	463964	5062560	0.719359	#N/A	#N/A	0.796494	0.000222	1	#N/A	#N/A	7
5008	465519	5068288	0.910401	#N/A	#N/A	0.944079	3.95E-08	1	#N/A	#N/A	1
153	466260	5064501	0.78211	0	#N/A	0.86548	1.49E-05	1	#N/A	#N/A	6
890	465633	5069430	0.957062	0.917295	0.955097	0.926471	2.56E-07	1	0.833333	0.642857	0
904	466964	5070311	0.965499	0.865307	0.982617	0.955882	7.76E-09	1	0.904762	0.857143	0
5022	467839	5069560	0.925475	0.879074	0.891338	0.923529	3.34E-07	1	-0.02381	0.380952	1
84	468489	5067663	0.842942	0.749318	0.7571	0.735437	0.001168	1	-0.5	-0.14286	5
175	469550	5065472	0.81375	0.721141	0.654367	0.914706	7.01E-07	1	-0.47619	-0.16667	5
160	469523	5063921	0.784986	0.707689	0.623629	0.862383	1.73E-05	1	-0.47619	-0.16667	6
83	467590	5072158	0.931103	0.791404	0.914419	0.908824	1.1E-06	1	0.142857	0.380952	1
907	468024	5071202	0.97527	0.969622	0.962273	0.955882	7.76E-09	1	0.904762	0.857143	0
5027	469682	5068210	0.841008	0.737004	0.775434	0.882406	6.08E-06	1	-0.5	-0.05695	4
5034	469808	5067470	0.834533	0.730583	0.716114	0.779412	0.000372	1	-0.42857	0.166667	5
104	468340	5073560	0.683535	0.524988	0.478395	0.773103	0.000445	1	-0.07143	-0.96735	9
5031	469853	5070791	0.893986	0.842165	0.807685	0.888578	4.24E-06	1	-0.02381	0.452381	1
5035	470390	5069518	0.852537	0.755483	0.747995	0.824258	8.6E-05	1	-0.33333	0.2446	2
125	470862	5072657	0.786895	0.52517	0.844267	0.635294	0.008182	1	-0.04762	0.02381	1
899	472204	5071424	0.831571	0.896004	0.71441	0.632353	0.008578	1	0.190476	0.428571	0
179	472381	5069302	0.887779	0.917409	0.808134	0.770588	0.000477	1	0.738095	0.761905	0
8	471966	5068634	0.862448	0.847019	0.730113	0.85	3.05E-05	1	0.047619	0.333333	4
190	474237	5066777	0.860599	0.87618	0.730452	0.891176	3.62E-06	1	-0.09524	0.095238	3
192	472144	5065452	0.833474	0.81897	0.689848	0.903681	1.59E-06	1	-0.19048	0.095238	5
25	475626	5066995	0.829201	0.056605	0.880148	0.873121	1.01E-05	1	0.863027	0.384371	0
5117	473227	5063729	0.732112	0.788905	0.704025	0.920588	4.32E-07	1	-0.02381	0.095238	4
168	477428	5066393	0.940768	0.977559	0.884895	0.907711	1.19E-06	1	0.690476	0.785714	0

169	475895	5064322	0.813468	0.858167	0.779295	0.847059	3.47E-05	1	0.190476	0.071429	3
166	474042	5062001	0.833279	0.790874	0.872962	0.78064	0.000359		0.190476	0.1253	3