
Factibilidad de Recargas Artificiales en el Acuífero Walla Walla, Oregón E.U.

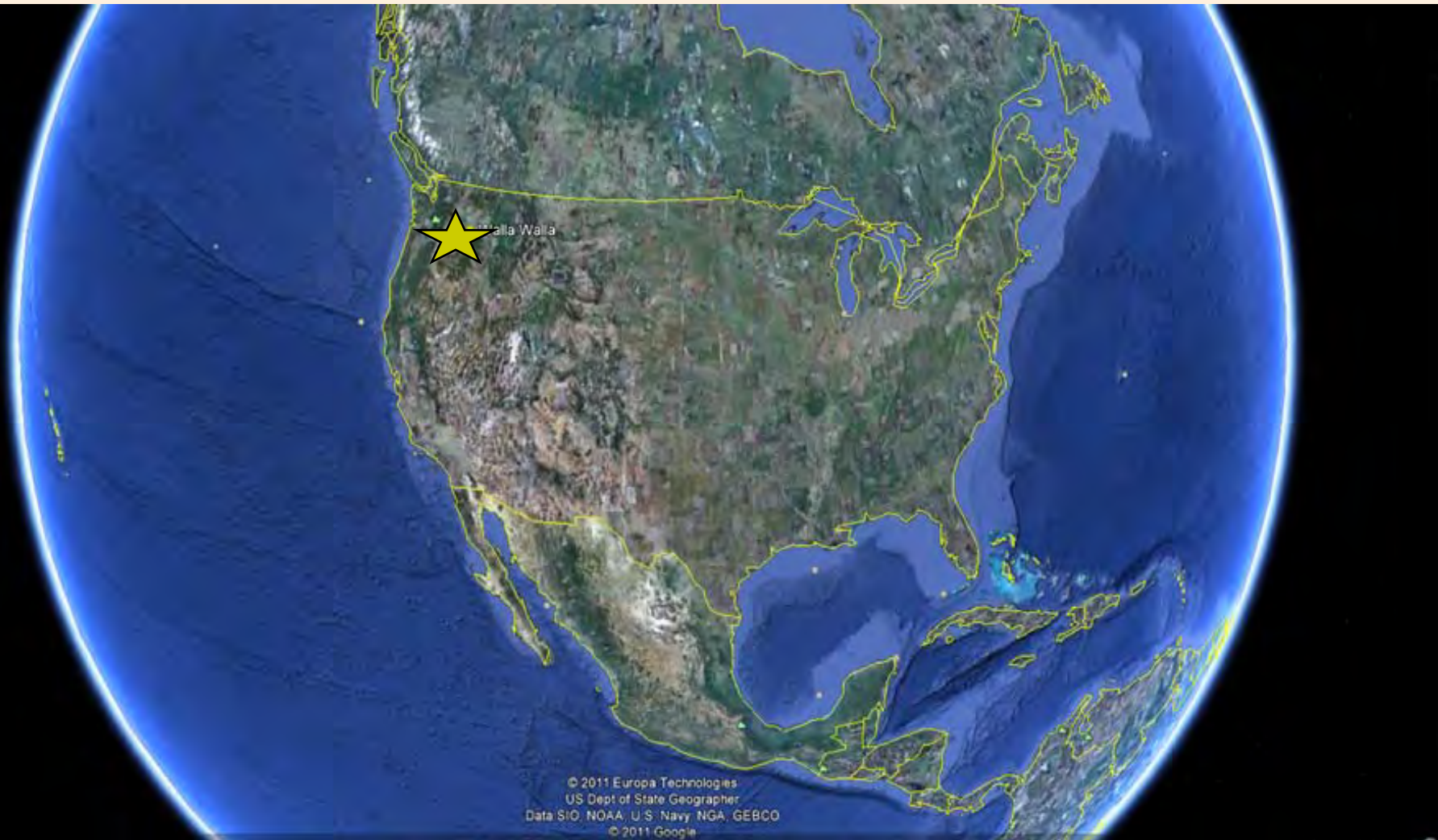
Arístides Petrides

June 10, 2011

Bienvenidos!!! Resumen de la Presentación

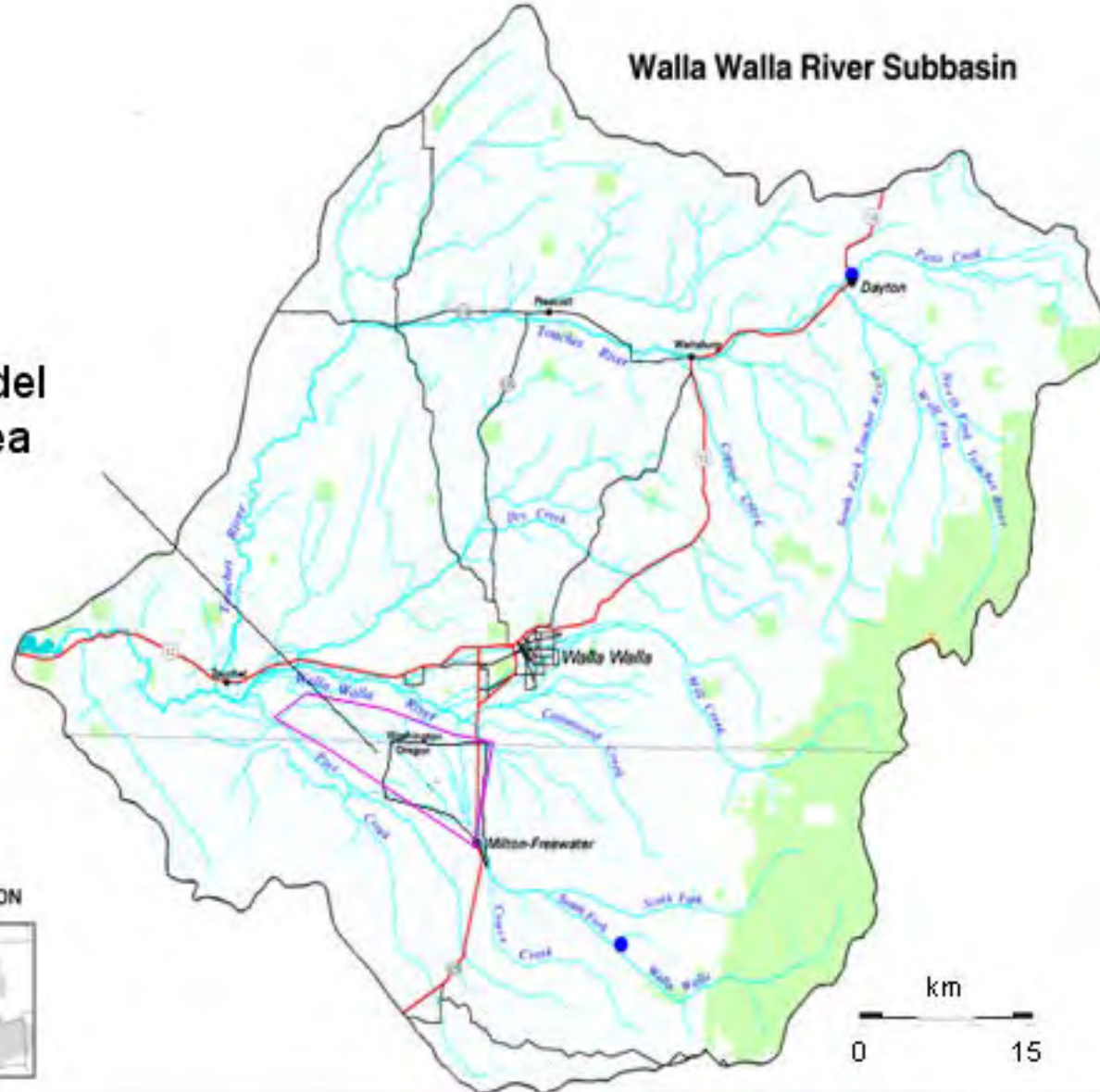
1. Historia del área de estudio
2. Desarrollo del modelo
3. Calibración & Validación
4. Evaluación de escenarios de administración

Walla Walla es el área de estudio en los E.U.



Walla Walla River Subbasin

Model
Area



El área del modelo son 231 km² compartidos por los estados de Oregón y Washington

EL clima es de tipo continental con inviernos fríos y veranos calientes

Precipitación 25 to 38 cm/year Oct-Mayo

Elev: 320 m a 228 m

Cuenca Walla Walla. Delineación rosa denota el área del modelo, la delineación negra denota el modelo anterior Petrides (2008).

Antecedentes

Debido a los desvíos para suplementar la serie de canales de irrigación, el Río Walla Walla quedaba seco durante los meses de verano.

En 1998 en la lista de los 18 rio con mas peligro de extinción.

Los distritos de irrigación para evadir una demanda en la suprema corte accedieron a dejar 0.7 m³/s (25cfs) en el río.



**FOR THE FIRST TIME IN 100 YEARS,
WATER IS FLOWING IN OREGON'S WALLA
WALLA RIVER BASIN YEAR ROUND.**

LOWER CONSERVATION POLICY MEETING-PORTLAND, OREGON



This year over \$24 million Lottery profits will go to watershed enhancement projects around the state. Like the River Conservation project in Millican-Fremont, where local farms needed so much water for crops, there wasn't enough left in the river for fish.

A Lottery-funded grant from the Oregon Watershed Enhancement Board helped farmers solve the problem by surrounding water. An open irrigation ditch was enclosed so the water in it wouldn't evaporate or seep into the ground, and wasteful flood irrigation systems were replaced with sprinklers. And the water that was saved went back into the river for fish.

Now, thanks to a spirit of cooperation and a Lottery-funded grant, the Walla Walla River runs in Oregon year round and there is enough water for both farms and fish.



It does good things™

LOTTERY DOLLARS SUPPORT THE OREGON YOU LOVE

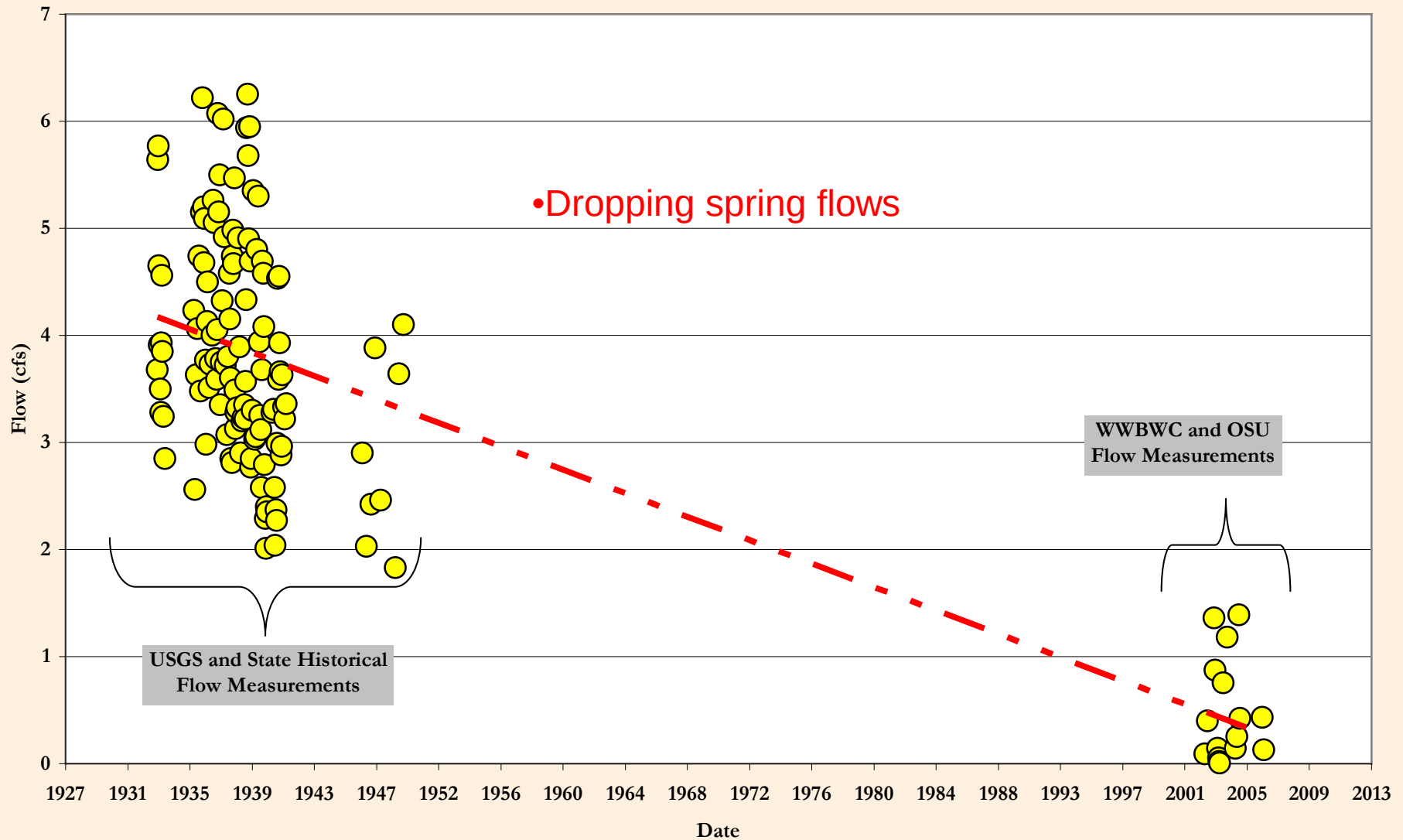
This year, over \$24 million in Lottery profits will go to watershed enhancement and salmon habitat restoration.

Lottery dollars also support education, job creation, and state parks.

Oregon

Lottery games are based on chance and should be played for entertainment only.

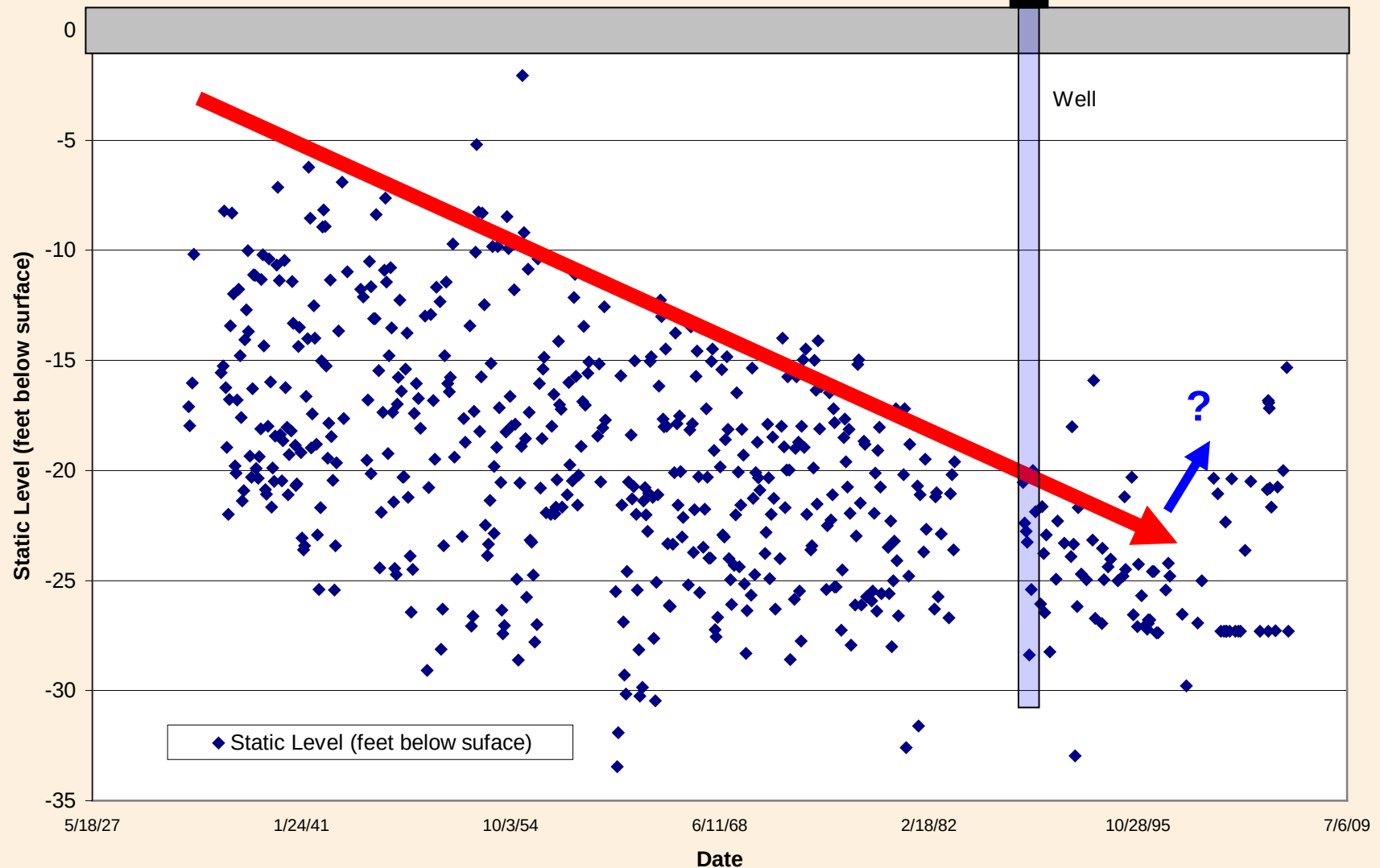
Flujo en los manantiales



Los manantiales que sirven de habitat para especies peligro de extinción disminuyen

Niveles del acuífero en los últimos 70 años

GW-17 McKnight State Observation Well
1933 to 2005 Static Level



La altura del agua subterránea disminuye Bob Bower (2009)

Alternativas para la administración de recursos hidrológicos

- ❑ Recargas artificiales de acuíferos
- ❑ Incrementar las eficiencias de irrigación incluyendo el cubrimiento de canales de irrigación
- ❑ Construir una presa de 2 billones de dólares



Foto de las pruebas piloto de recargas artificiales
HBIDC Feb. 2007

Objetivos del proyecto de investigación

- ❑ Cuantificar los recursos y demandas hídricas
- ❑ Predecir el impacto del manejo de recursos:
 - Recargas artificiales
 - Recubrimiento de canales de irrigación
 - Cambios climáticos y decisiones agrícolas
- ❑ Desarrollo de una metodología para la evaluación de locaciones para recargas artificiales y de restauración del ambiente

Selección del modelo IWFM

Model Name / Source	Type	Source Code Available	Application / Objective
TOPMODEL, Version 97.01 University of Lancaster Freely distributed	Semi-distributed	Yes	Basin Simulation / Storm Flow
MIKE SHE, Version Enterprise Deluxe 2004 Danish Hydraulics Institute Approximately \$9,500	Distributed	No	Basin Simulation / Storm Flow
HEC-HMS, Version 2.2.2 US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center Freely distributed	Lumped or Distributed	No	Storm Runoff
IWFM, Version 2.4 California Department of Water Resources Freely distributed	Distributed (Finite Element)	Yes	Water Resource Management
MMS-PRMS, Version 1.1.7 US Geological Survey Freely distributed	Lumped (HRUs)	Yes	Basin Simulation / Storm Flow
DHSVM, Version 2.0.1 University of Washington Freely distributed	Distributed	Yes	Basin Simulation / Storm Flow
SWAT, Version AVSWAT 2000 USDA Blackland Research Center Freely distributed	Lumped (HRUs)	No	Basin Simulation / Agrarian BMP

Ejemplo de aplicación IWFM

California Central Valley Simulation

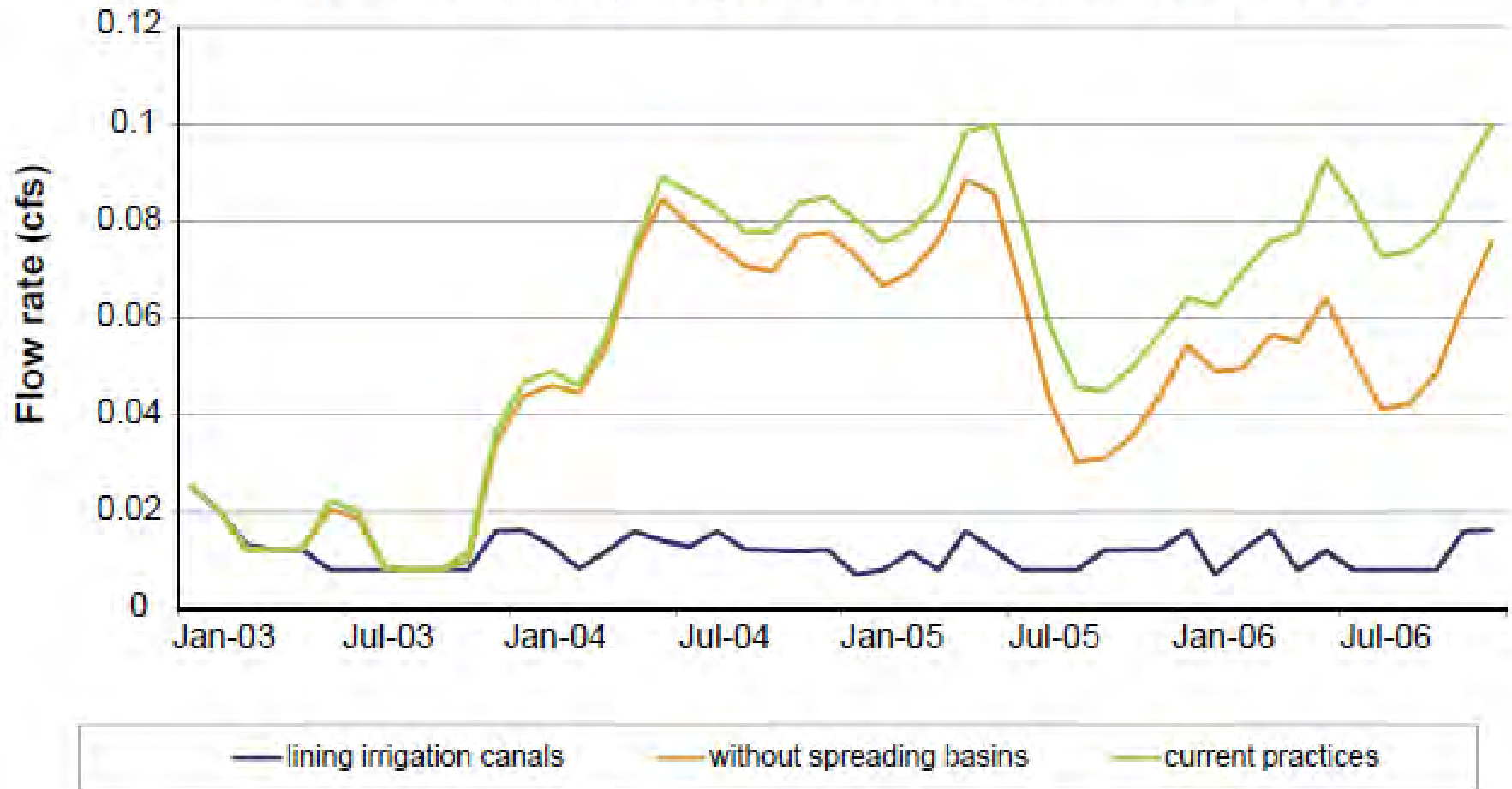
- Área: Aprox 20,000 mi² (51,800km²)
- Numero de acuíferos : 3
- Numero de nodos por acuífero: 1,393
- Numero de nodos por ríos: 432
- Simulación del periodo 1921 – 2009 (mensual)

Figure Courtesy of Charles Brush, California



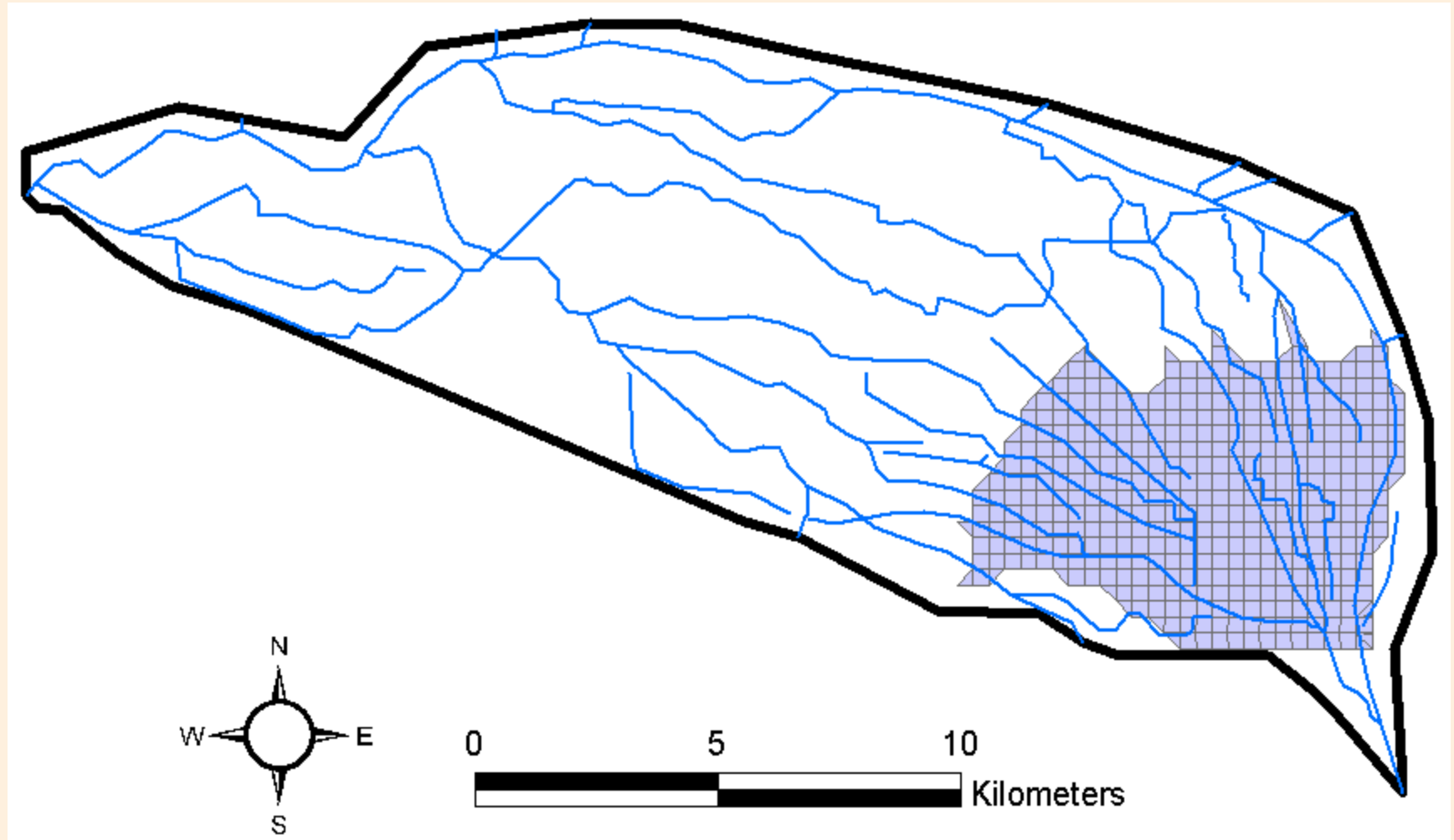
Resultados anteriores

Johnson Creek Spring model scenarios, 2003-2006



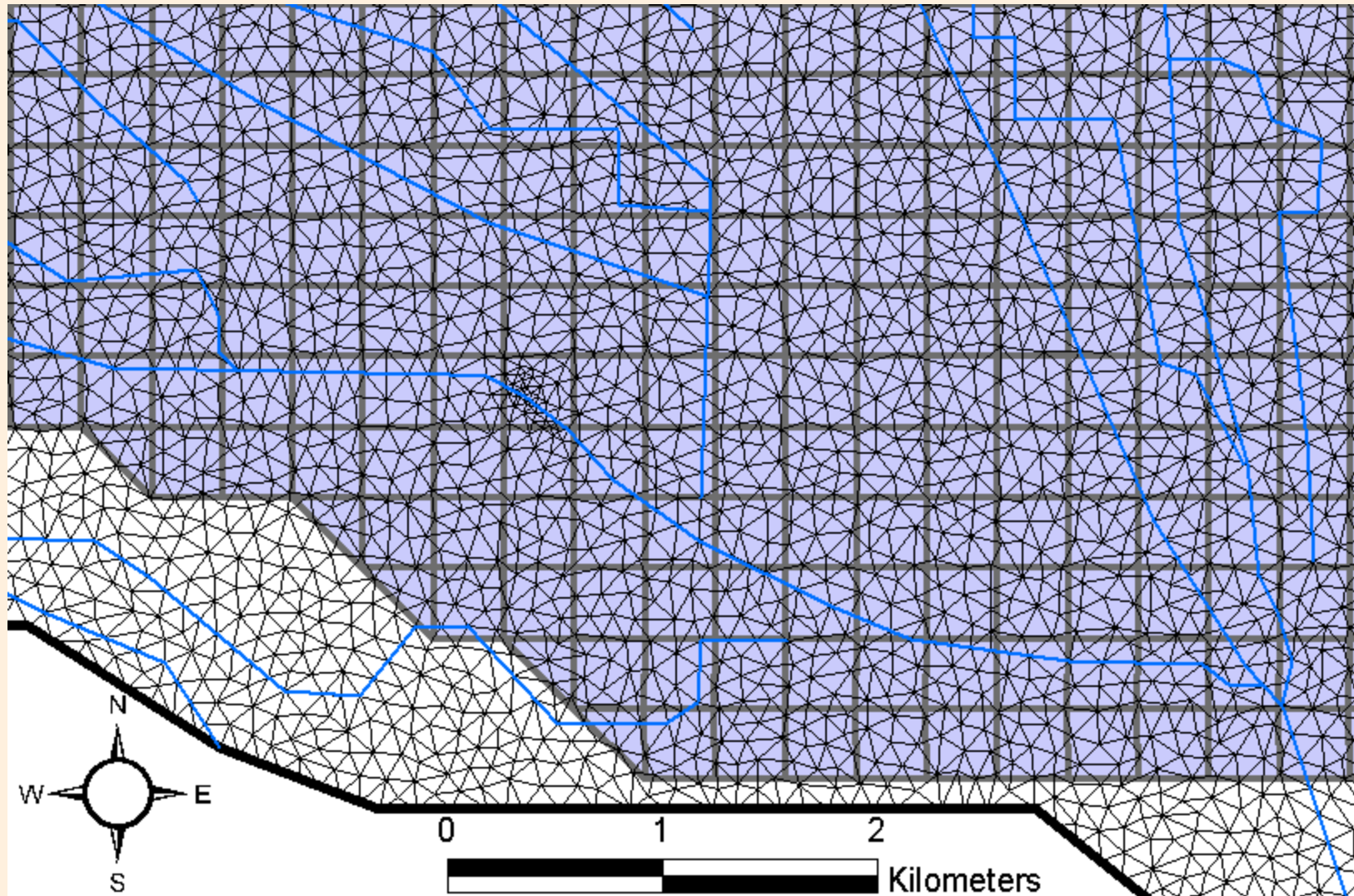
IWFM model scenarios M.S. Thesis (2008)

Comparación del nuevo modelo

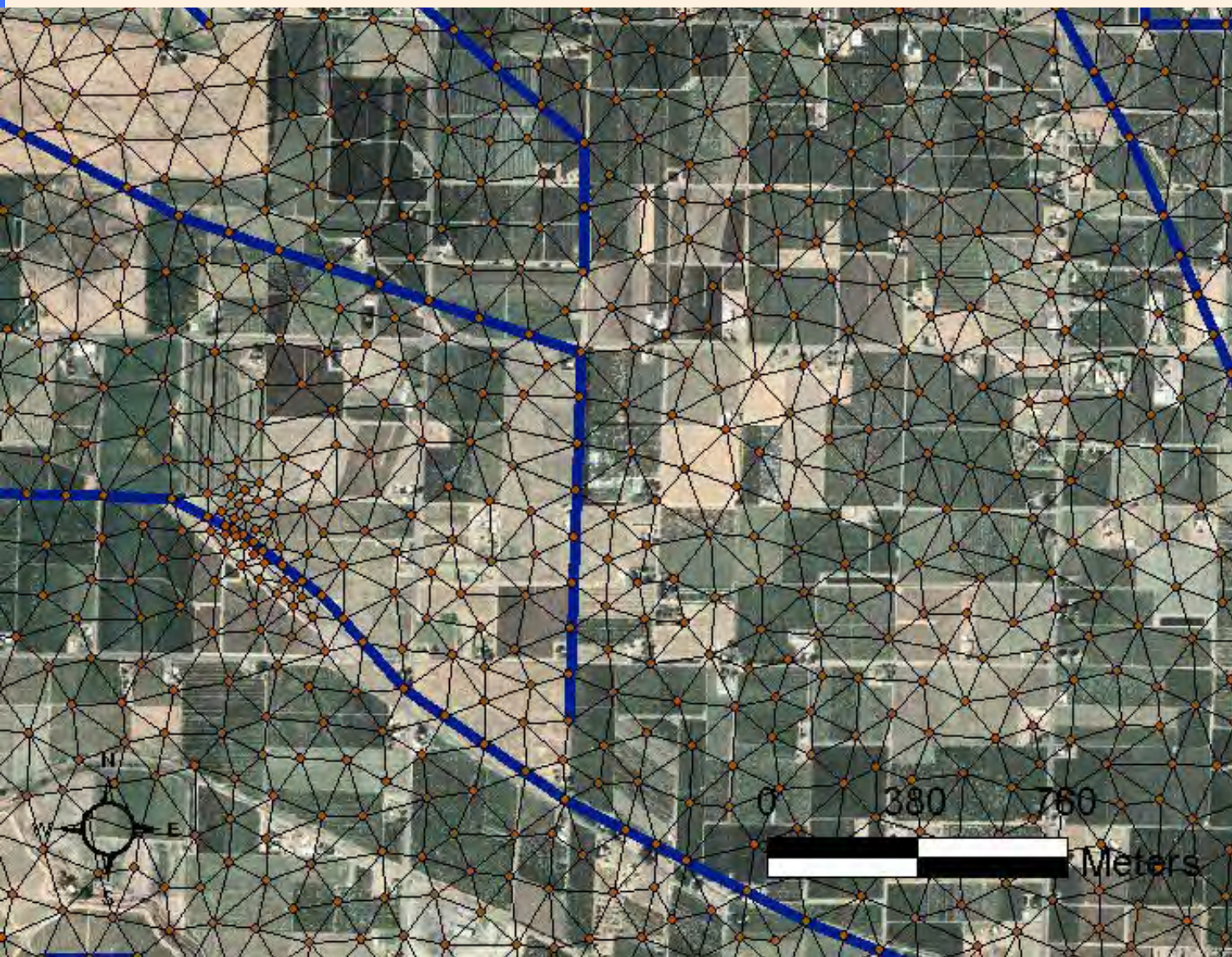


Expansión del área simulada desde 43 a 231 km²

La definición del la nueva maya es 10 veces menor



Elementos variables triangulares con separación de 100 metros

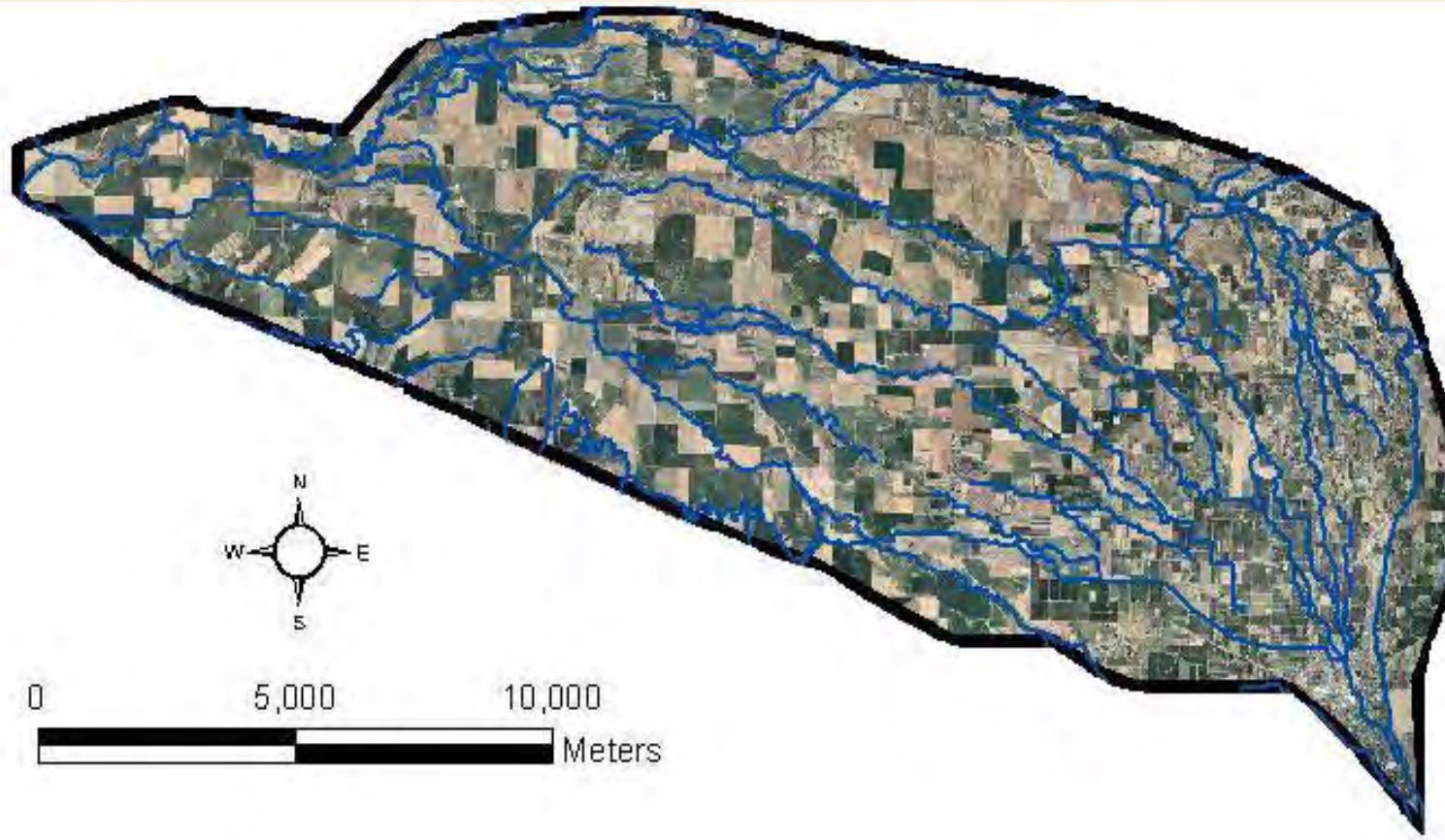


Elementos de simulación tan pequeños para poder definir los canales de irrigación

Un total de 18,520 nodos para 36,480 elementos.

En promedio tenemos 4 a 5 elementos por parcela de tierra.

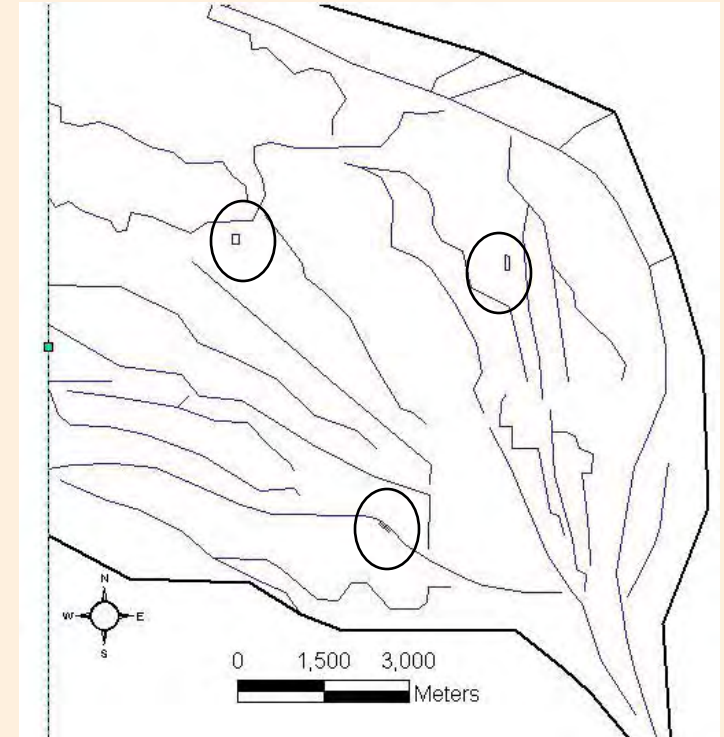
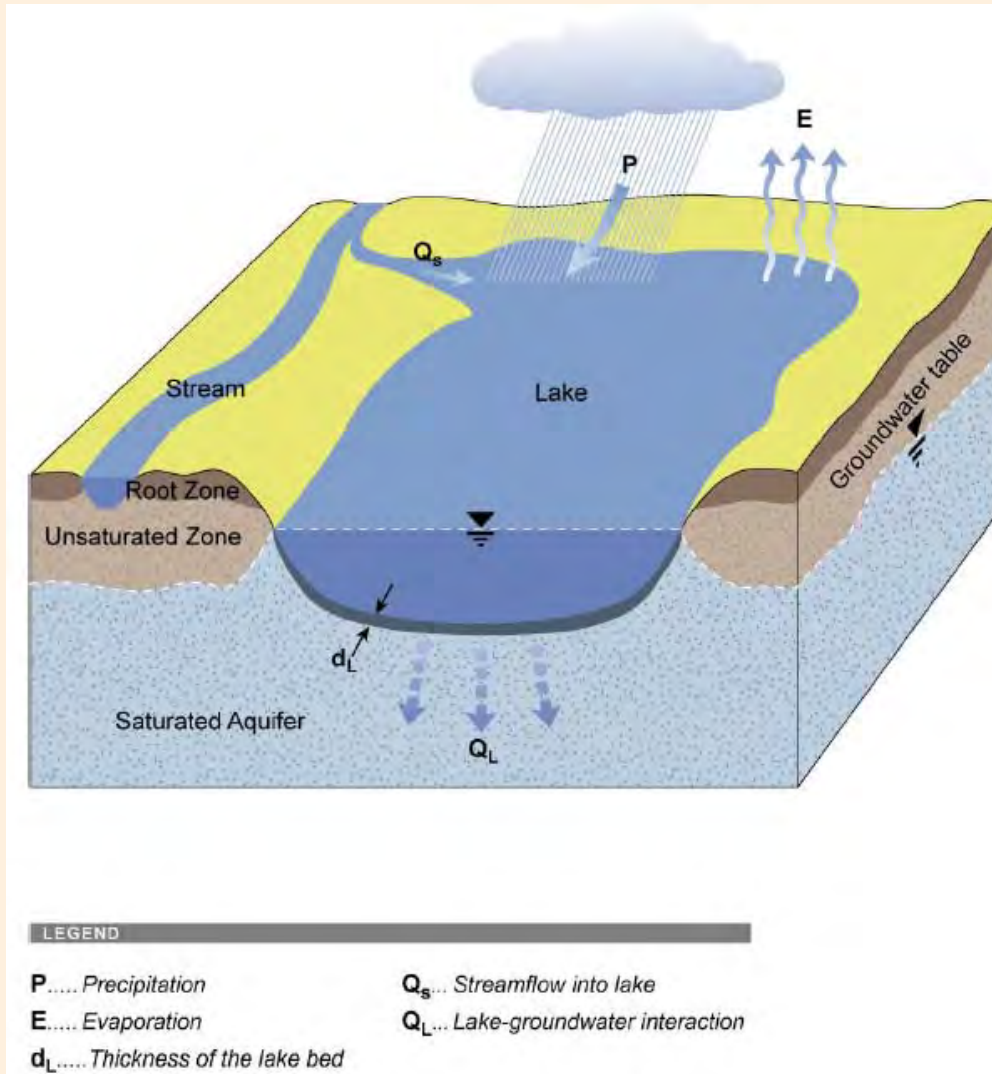
Systemas naturales incorporados en el modelo



64 segmentos
de ríos con
aproximado de
220 km

Los segmentos de aguas superficiales incluyen el río Walla Walla, manantiales y canales de irrigación..

Recargas artificiales simuladas como lagos en IWFM



Tres pruebas piloto en el área

Modulo de lagos en IWFM

Representación del sistema de acuíferos

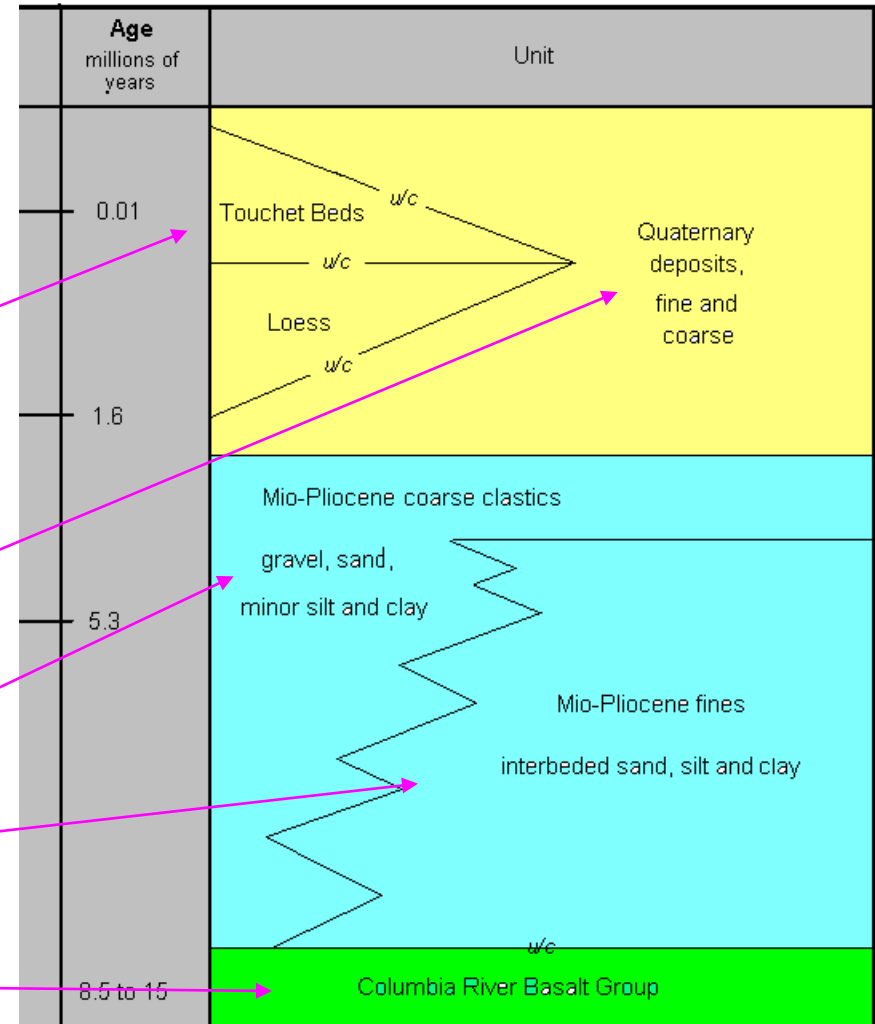
Suprabasalt Sediment Stratigraphic Chart, Walla Walla Basin

Capas de acuíferos:



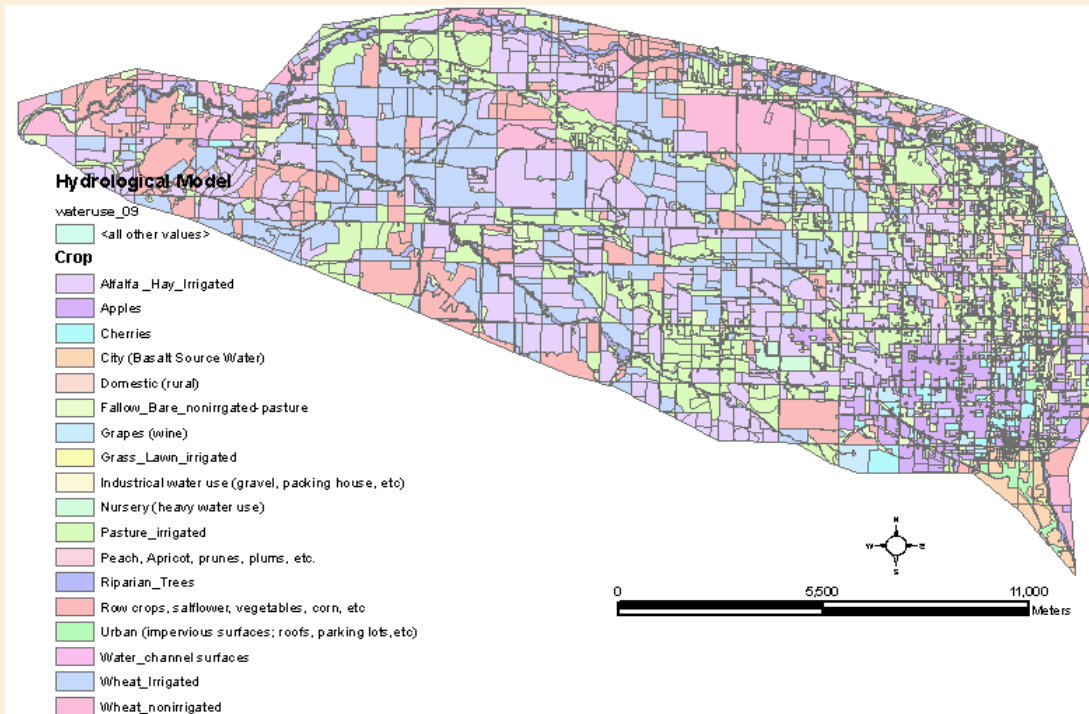
Confinamiento de Arsilla: 70 m

Capas de Basalto



From: Test Site Geology, Hydrogeology and Water Quality (Lindsey 2004)

Uso de suelo y agua

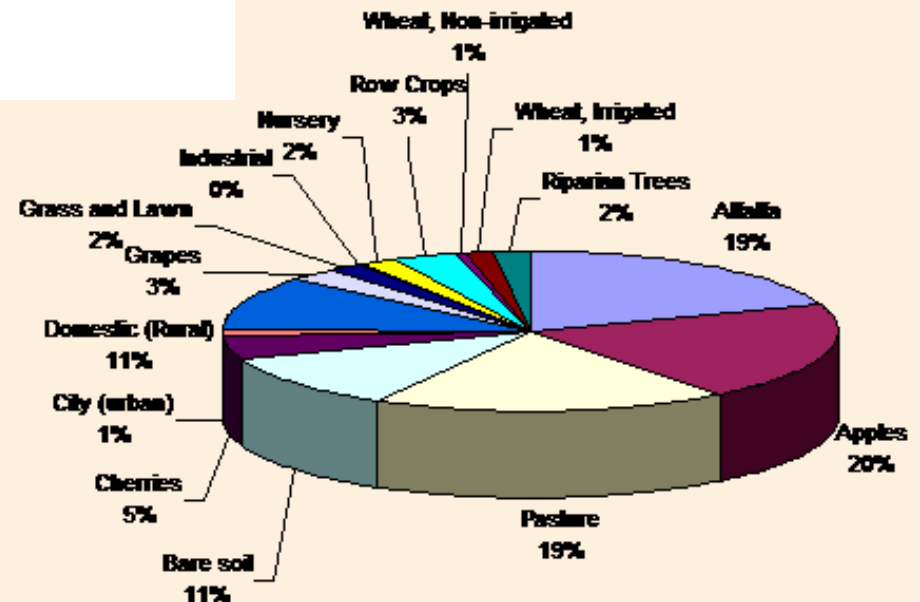


20 usos de suelo

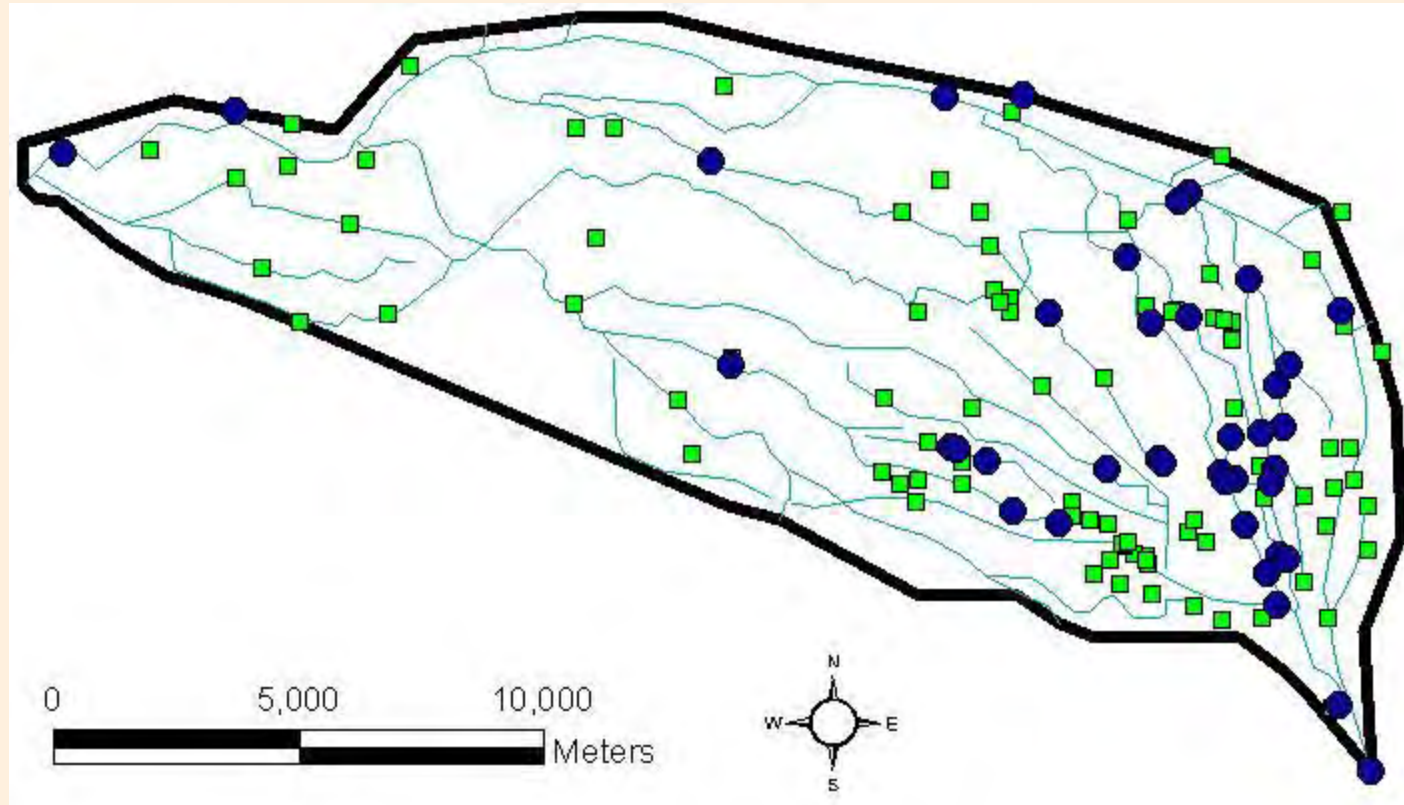
17 productos
agricolas

$$Et_{act} = (ET_o * K_c) K_s$$

FAO 56 Penman-Monteith



Lugares de monitoreo



Observaciones de campo:

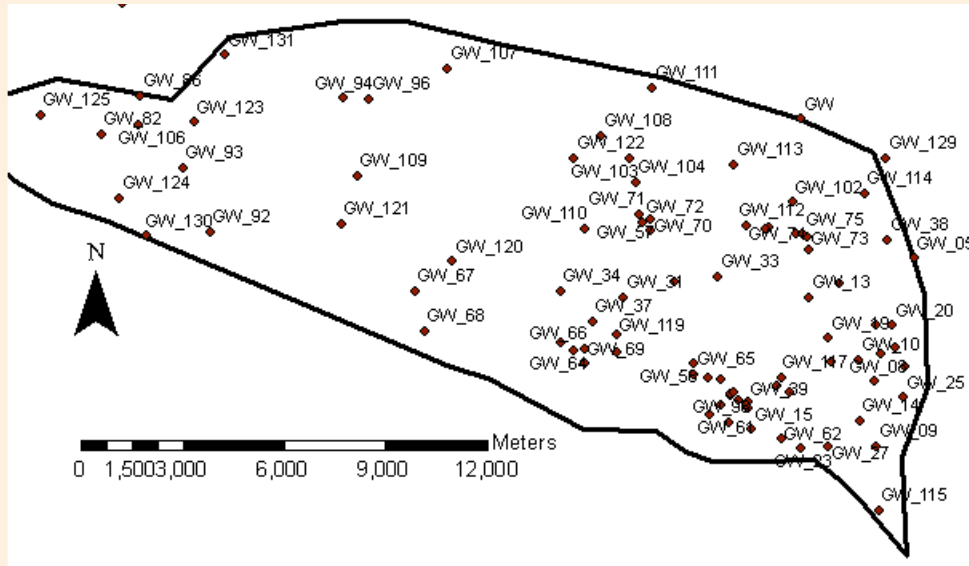
117 pozos de observación

45 estaciones de agua superficial

3 Estaciones de evaporación

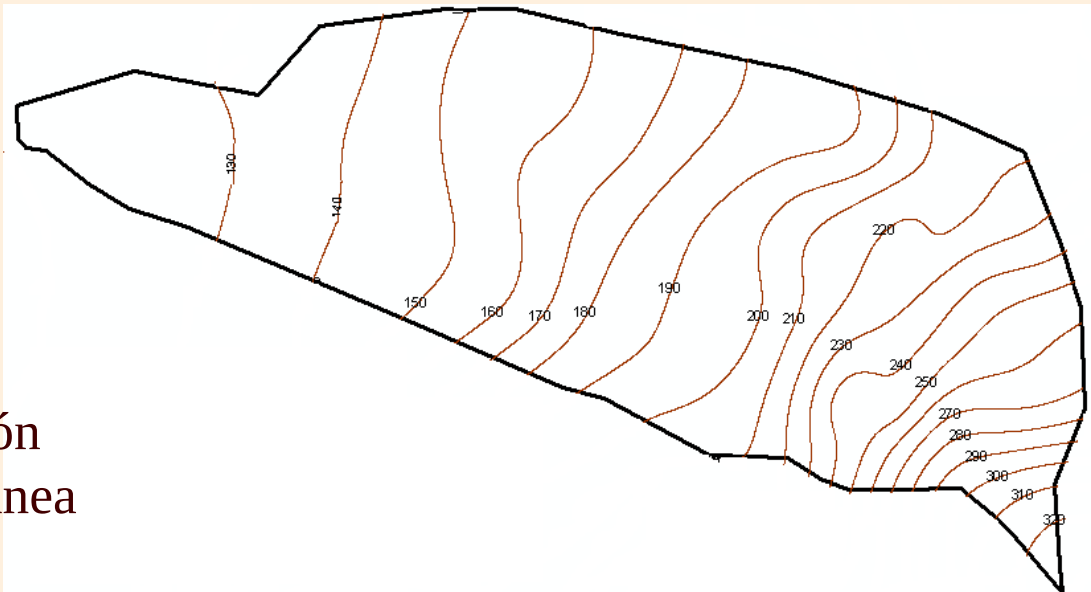
Mapa en GIS. Puntos azules representan pozos de monitoreo. Cuadrados verdes representan estaciones de superficies.

Condiciones Iniciales & de frontera



Base de datos de Pozos

Mapa de elevación
del agua subterránea
(m) msl



Análisis de sensibilidad de parámetros del modelo

- ❑ Cuales son los parámetros con mas influencia en el modelo?
 - Conductividad?
 - La porosidad de los suelos?
 - Demanda de los productos agrícolas?
- ❑ Para evaluar necesitamos una sola estadística
- ❑ Agua subterránea y superficial tiene parámetros y magnitudes diferentes
- ❑ Para utilizar toda la información posible nosotros calculamos el peso de cada observación

Ejemplos de fuentes de incertidumbre

- ❑ Ajuste de presión barométrica
- ❑ Error de coordenadas en el GPS
- ❑ Diferencia entre la locación del modelo y los pozos
- ❑ Errores de instrumentación
- ❑ Mantenimiento y puesta en marcha de instrumentación
- ❑ Sumamos las variancias, y cada peso es $\omega=1/\Sigma\sigma^2$

Análisis de Sensibilidad

- Sensibilidad son derivadas de variables dependientes con respecto a parámetros del modelo. Calculadas por diferencias centrales o futuras. In otras palabras: Cuanto cambian los resultados del modelo con respecto a cambios en los parámetros?

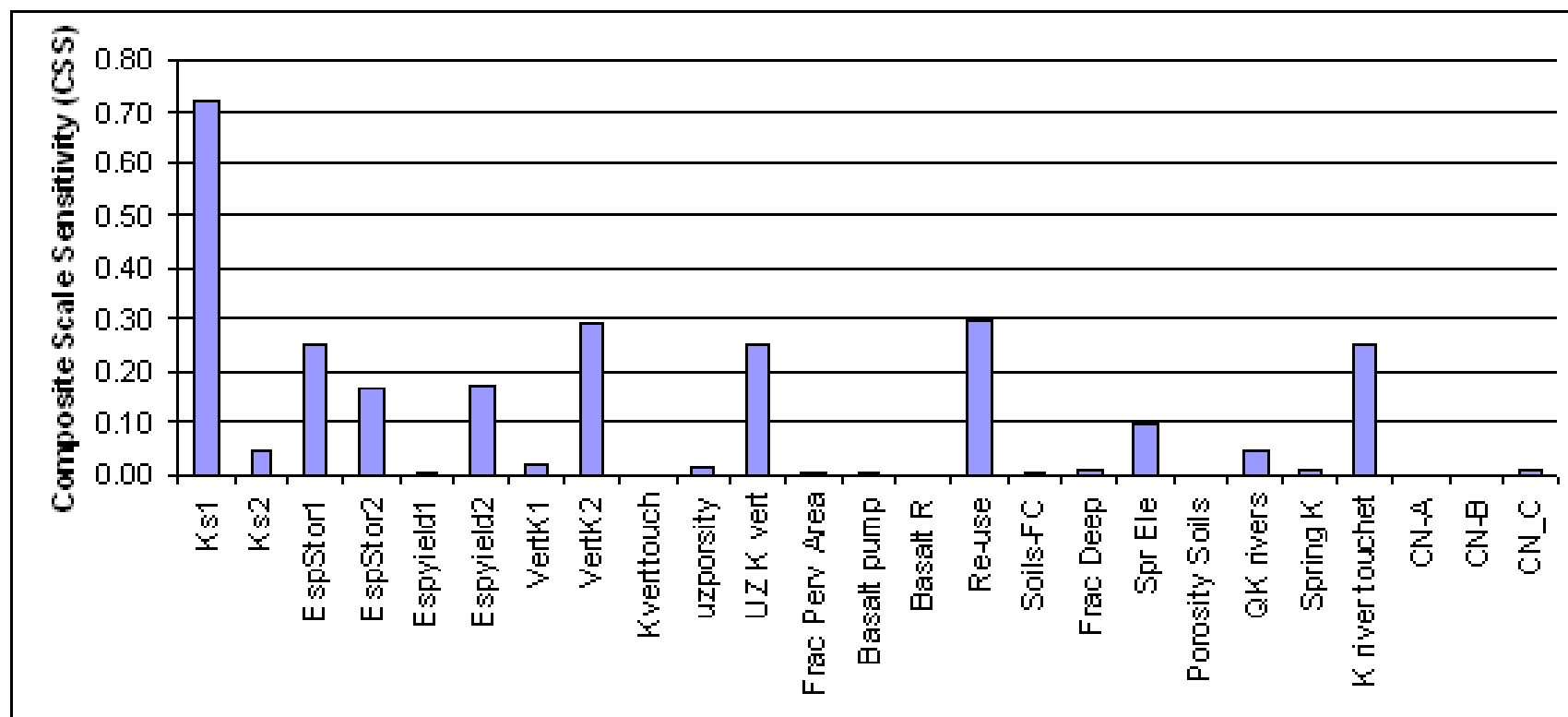
$$\frac{dh}{dP} = \frac{h(p + \Delta p) - h(p)}{\Delta p}$$

- Para comparar las sensibilidades de diferentes parámetros, necesitamos de la misma escala. Mary Hill (2007) propone el uso de las siguientes estadísticas:

$$dss = \frac{dh}{dp} p \omega^{1/2}$$

$$css = \sum_1^{NO} (dss^2 / NO)^{1/2}$$

Composite Scale Sensivities for 27 parameters GW & SW



Estimación de Parámetros

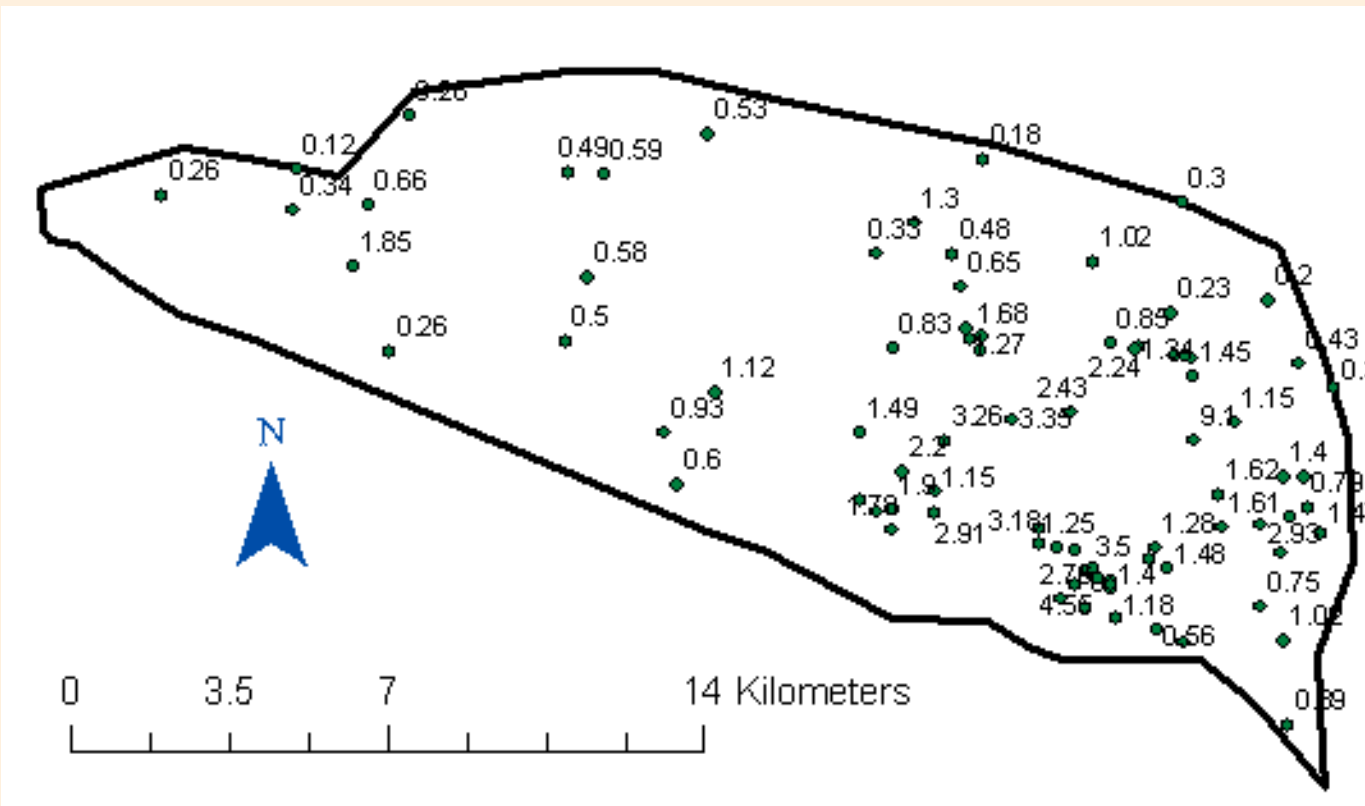
$$\frac{(h_{obs} - h_{p2}) * (P_2 - P_1)}{h_{p2} - h_{p1}} = P_{obs} - P_2$$

Sugerida Simplificación de la parameterizacion Gauss-Newton

Calibration of Selected Parameters

Variable	Acronym	Starting Value	Estimated Value max	min
Hydraulic conductivity Quaternary	Ks1	90.5	150.0	60.9
Hydraulic conductivity Mio-Pliocene	Ks2	30.5	38.0	27.0
Specific Storage of aquifer 1	EspStor1	20.5	25.6	
Specific Storage of aquifer 2	EspStor2	20.5	15.4	
Specific yield aquifer 1	Espyield1	0.2	0.25	
Specific yield aquifer 2	Espyield2	0.2	0.15	
Vertical conductivity 1	VertK1	6.3	10.0	6.5
Vertical conductivity 2	VertK2	3.5	3.8	2.7
Vertical conductivity soils	UZ K vert	3.0	3.8	2.3
Agricultural Re-use water	Re-use	0.95	0.5	0.7
Streams leakage over Touchet	K river touchet	1.2	1.5	0.9
Streams leakage over quaternary	QK rivers	2.0	2.5	1.5

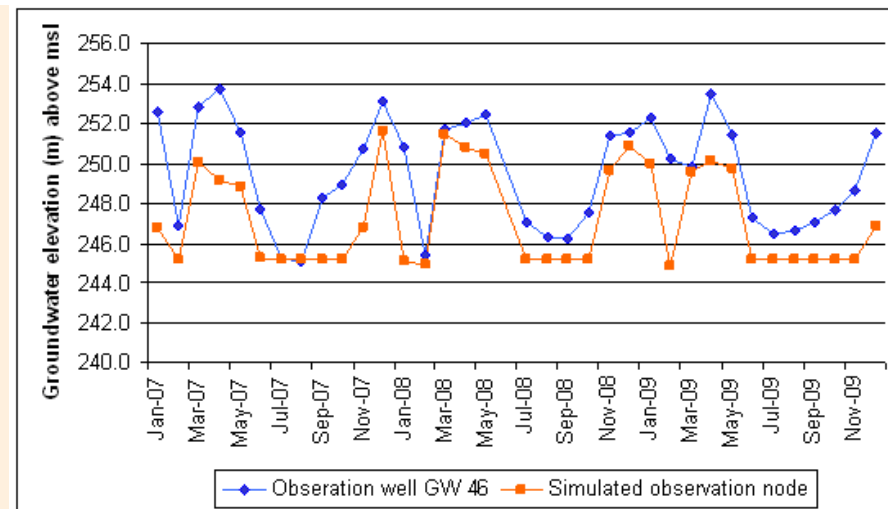
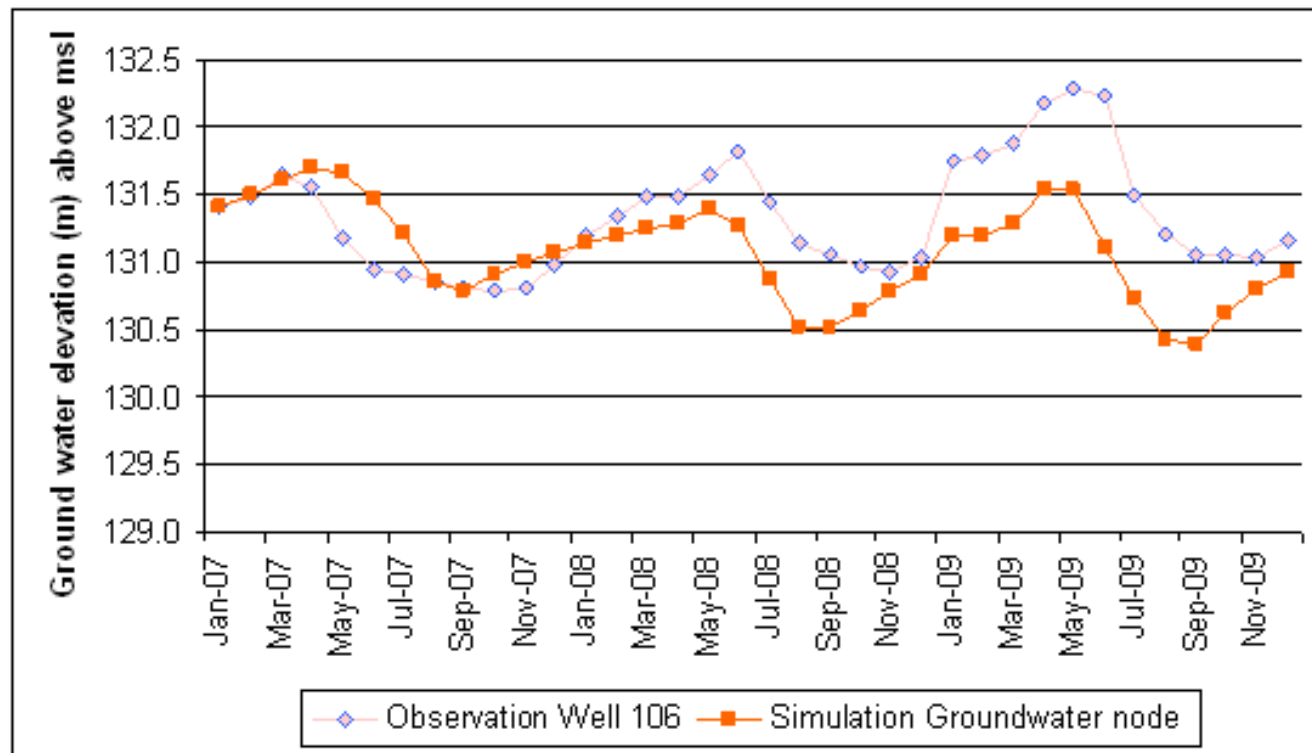
Statistical Measurements of Overall Model Fit



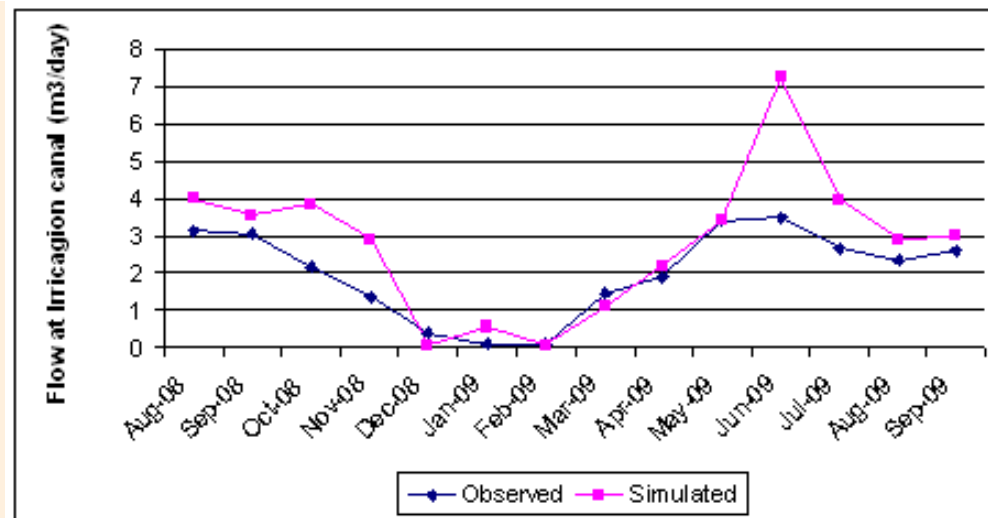
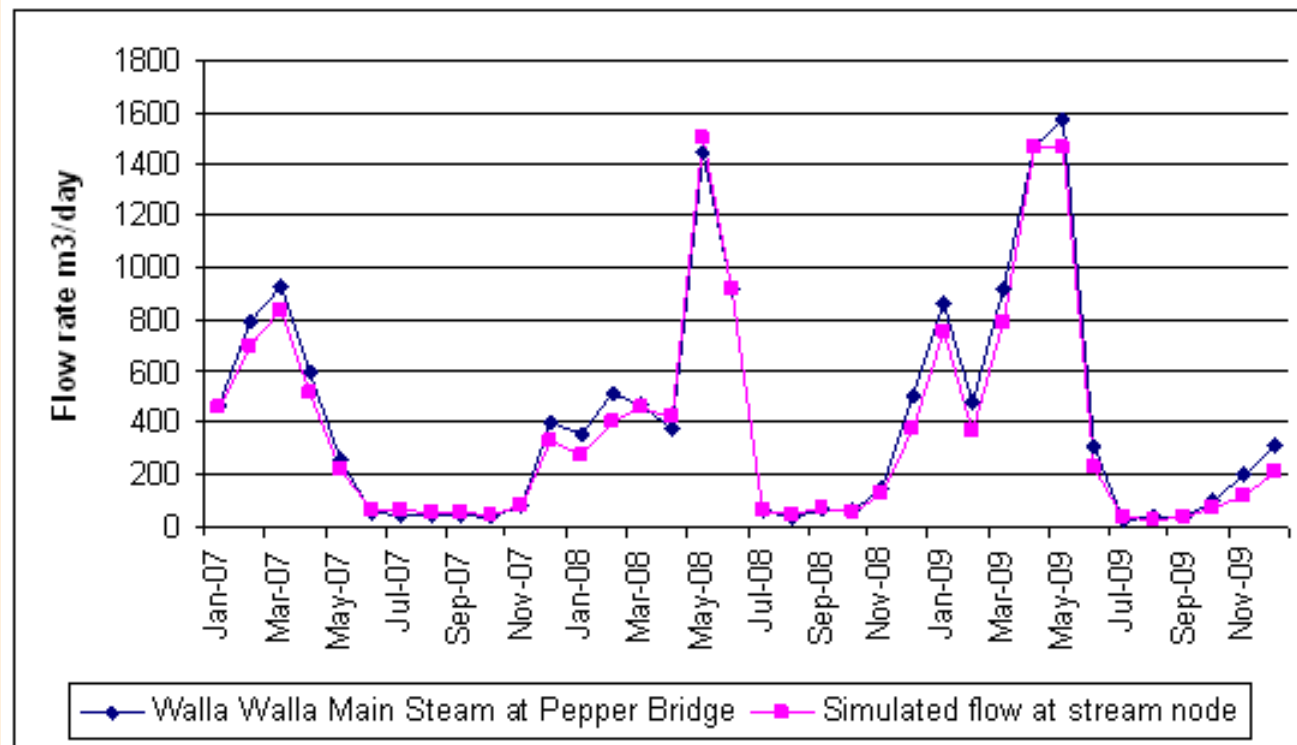
Sum of Squared Error	14,800
Obs. Wells	1,949
SD (GW only)	2.7 m
Nash (SWonly)	0.96
Weighted overall	140,000

GIS output map showing the SD at all wells without weights in the model area.

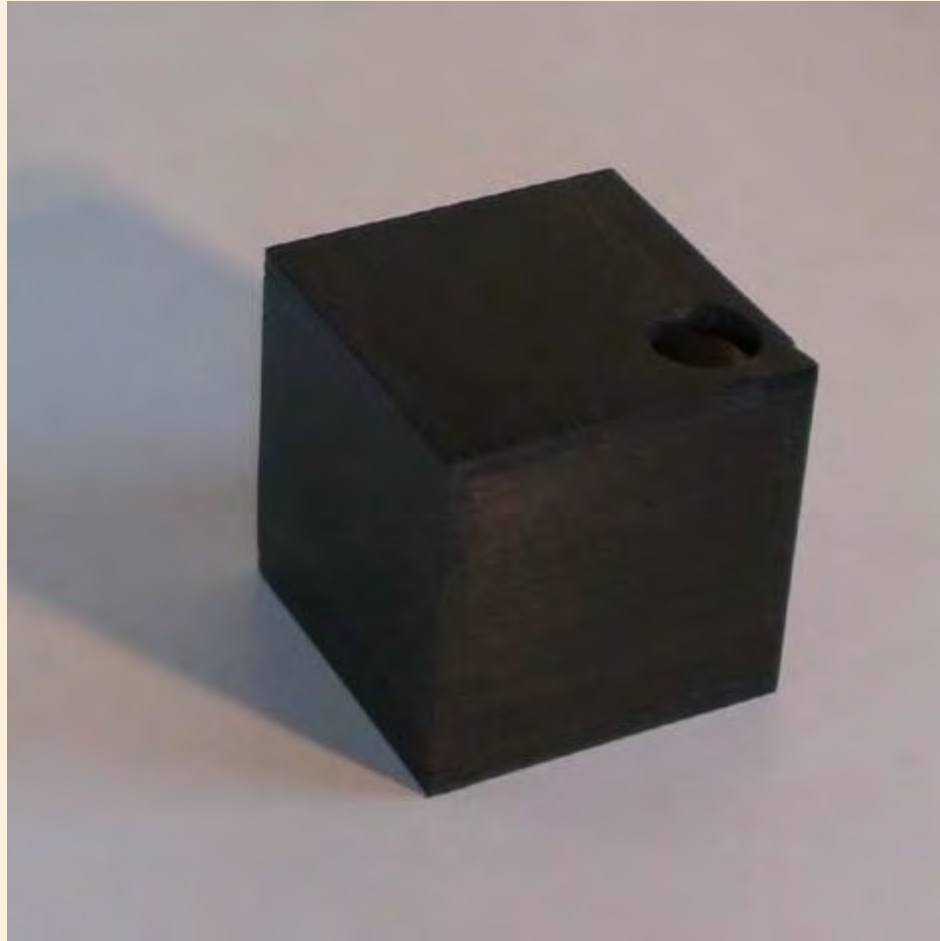
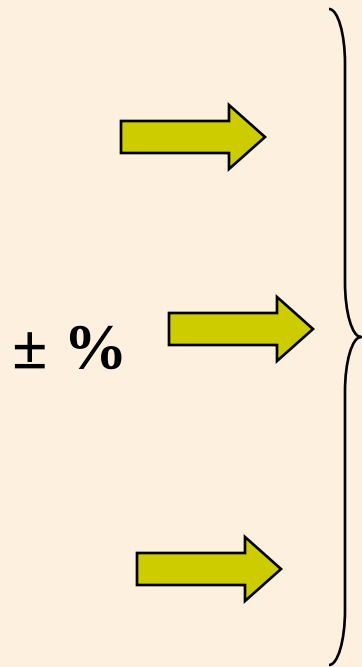
Groundwater Evaluation of Model Fit to Observations



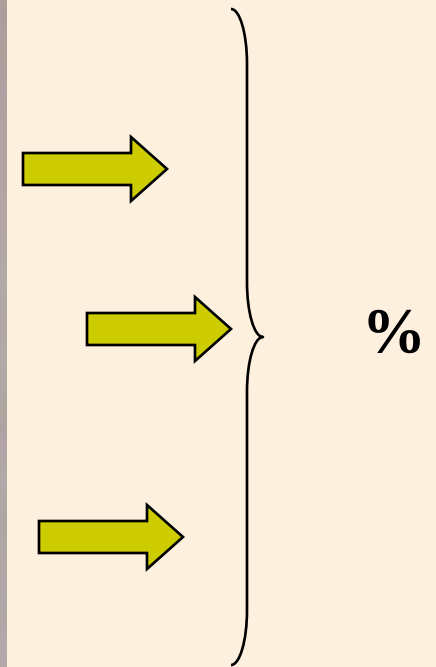
Surface Water Evaluation of Model Fit



Incertidumbre el
posible rango de
valores



Incertidumbre
en el posible
rango de
resultados



El modelo (“como caja negra”) corre
simulaciones con diferentes valores

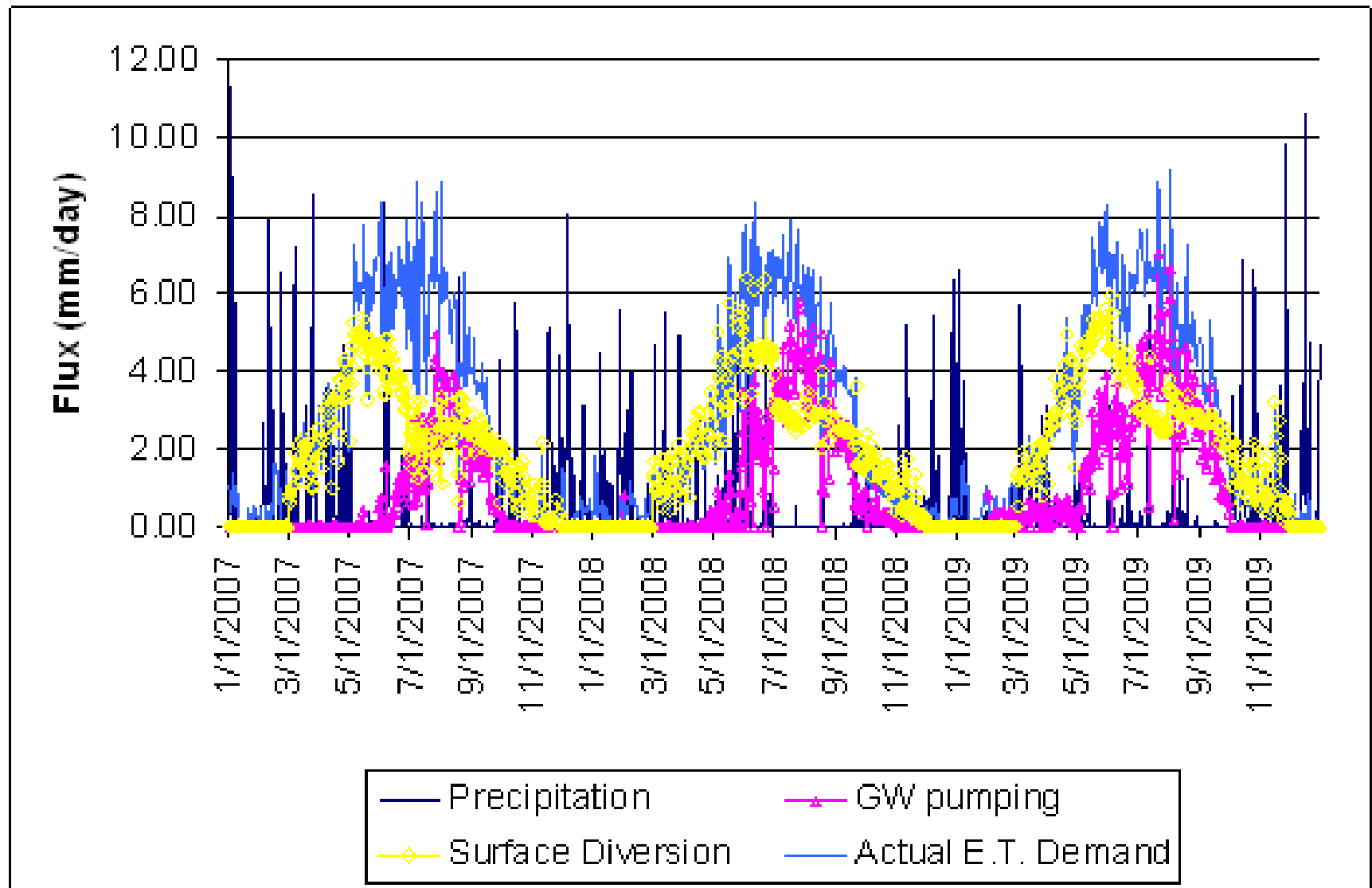
Ejemplo de estimación de recursos: Cambio de ET potencial

Source of Uncertainty	Reference ET from WWBWC stations A	Reference ET from Agrimet Stations B	Percentage of Change A/B (%)
Budgets Estimates			
Precipitation	40.8	40.8	100%
Actual ET	182.3	211.9	116%
Deep Percolation	51.2	40.8	80%
Pumping	60.3	66.7	111%
Model surface inflows	680.8	680.8	100%
Model surface outflow	633.8	622.5	98%
Surface Diversions	122.0	100.9	83%
Change in Groundwater Storage	-30.1	-31.9	94%
Overall GW Budget discrepancies	-0.6	-0.6	100%
Model Fit of <u>groundwater</u> S.D.	2.77	2.82	0.05 (m)
Model Fit to <u>surface flows</u> Nash-Sut (EFF)	96%	97%	+1%

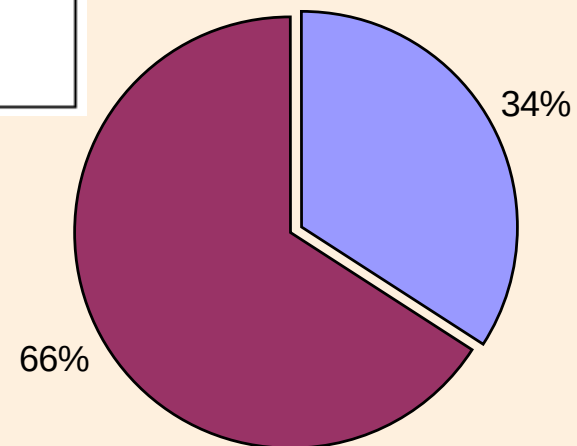
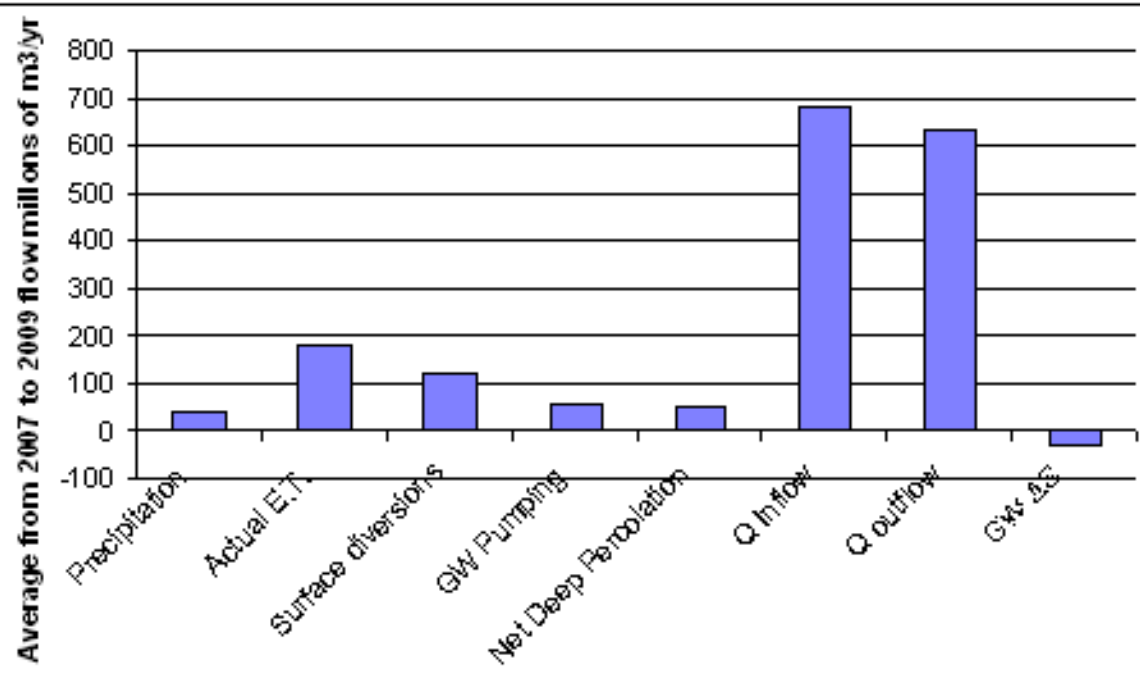
Análisis de incertidumbre

	% change of input values	% change in model output	In relation to Surface flow
Reference ET	50%	16%	4.5%
Precipitation	15%	15%	0.6%
Leakage from irrigation canals	50%	2%	2.4%
Surface Inflows	30%	24%	24%
Supply Rate Diversions/ Pumping	20%	12%	2.3%

Water Budget Analysis

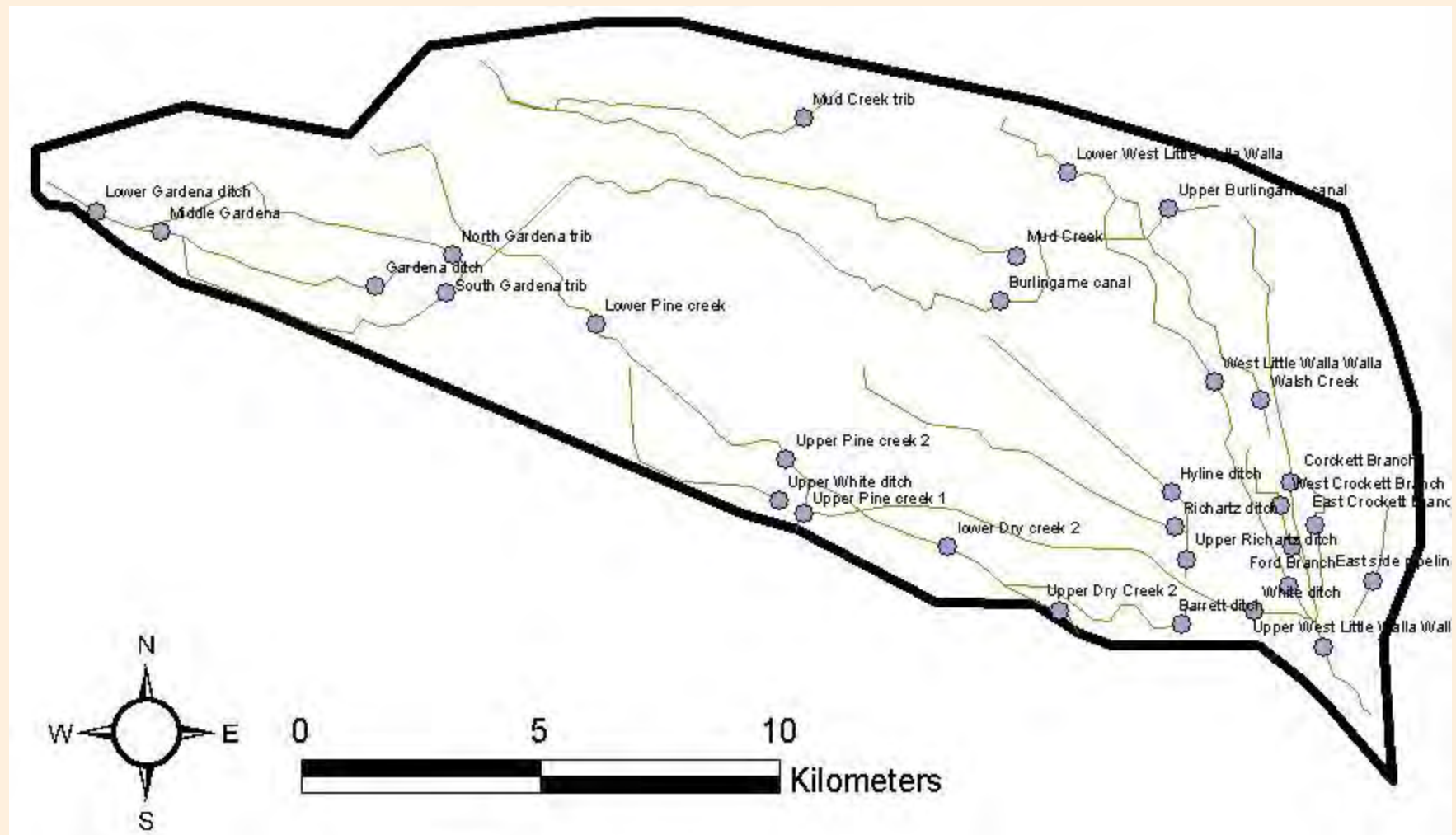


Water Budget as Cumulative Flow & Irrigation Source



■ Pumping irrigation ■ Surface water irrigation

Ejemplo de evaluación de escenarios de administración



Canales de irrigación simulados en el modelo

Ejemplo de evaluación de escenarios de administración

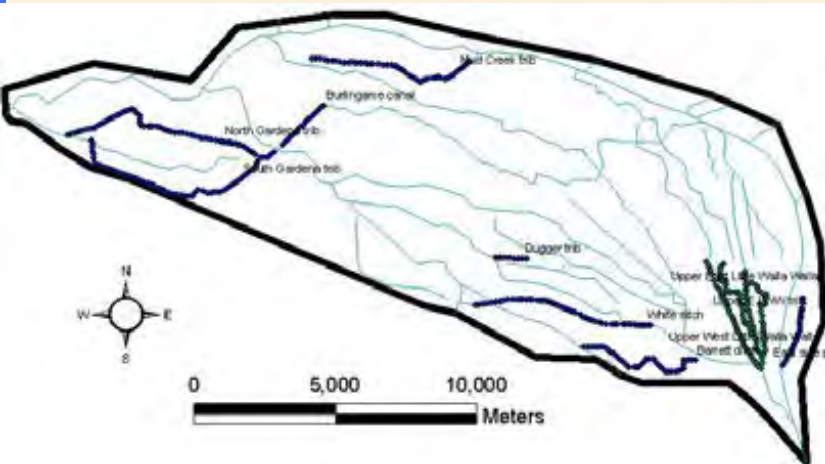
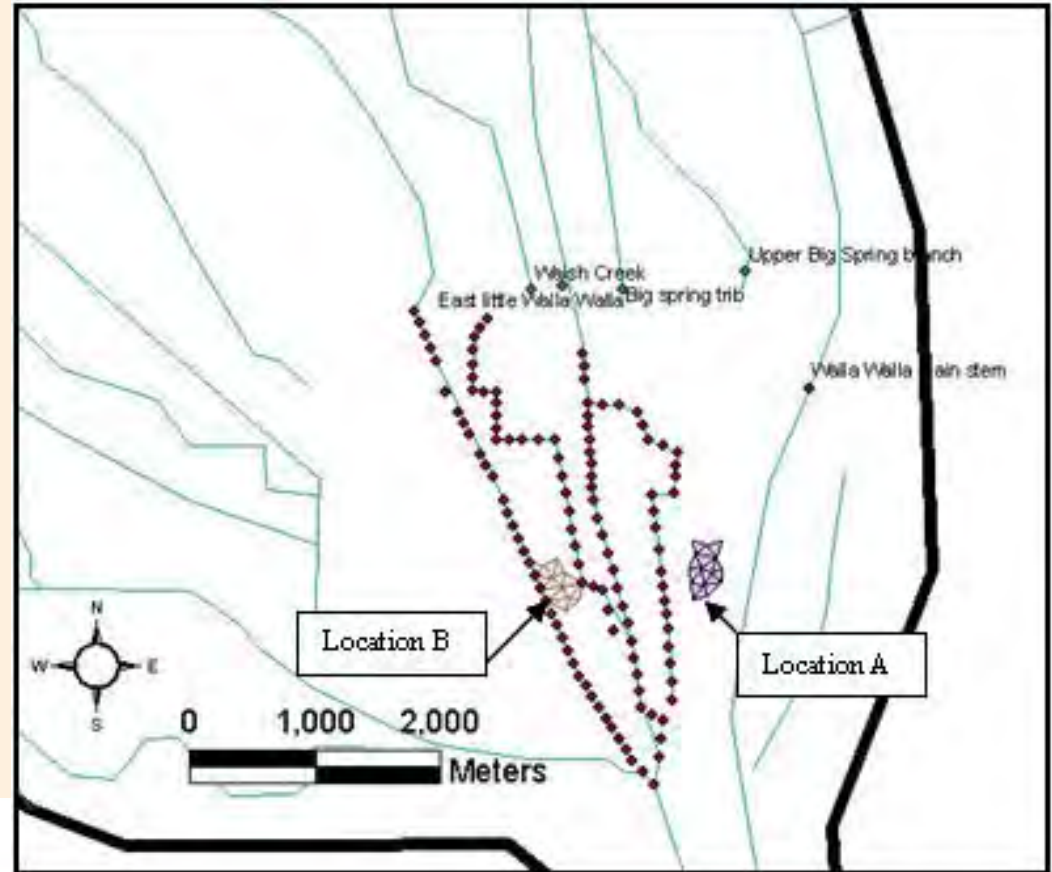
El modelo hidrológico estima la cantidad de agua que cada canal pierde para recargar el acuífero

La principal fuente de recarga del acuífero son los canales de irrigación que no son recubiertos

Los canales pierden 30% del agua que cargan.

Canal Name	Canal leakage Calibrated	Canal leakage Min.	Canal leakage Max.
Upper West Little Walla Walla	1.3 X 10 ⁹	6.5 X 10 ⁸	1.9 X 10 ⁹
Little Walla Walla ditch	1.9 X 10 ⁷	1.0 X 10 ⁷	2.5 X 10 ⁷
West Little Walla Walla	2.3 X 10 ⁷	2.3 X 10 ⁶	7.5 X 10 ⁶
Upper Dry Creek 2	1.3 X 10 ⁸	6.5 X 10 ⁷	1.9 X 10 ⁸
lower Dry creek 2	1.9 X 10 ⁸	9.9 X 10 ⁷	2.9 X 10 ⁸
Upper White ditch	2.9 X 10 ⁷	1.6 X 10 ⁷	3.8 X 10 ⁷
Richartz ditch	5.0 X 10 ⁷	2.5 X 10 ⁷	7.5 X 10 ⁷
Upper Burlingame canal	3.5 X 10 ⁸	1.4 X 10 ⁸	5.6 X 10 ⁸
Burlingame canal	6.3 X 10 ⁶	3.4 X 10 ⁶	8.6 X 10 ⁶
Gardena ditch	9.1 X 10 ⁶	59 X 10 ⁶	1.0 X 10 ⁷
Lower Gardena Ditch	4.9 X 10 ⁷	2.7 X 10 ⁷	6.3 X 10 ⁷
North Gardena Tributary	1.2 X 10 ⁸	6.1 X 10 ⁷	1.7 X 10 ⁸
South Gardena Tributary	6.3 X 10 ⁶	3.4 X 10 ⁶	8.6 X 10 ⁶
Mud Creek Tributary	8.7 X 10 ⁸	7.3 X 10 ⁸	9.1 X 10 ⁸
Dugger Creek Tributary	5.4 X 10 ⁶	2.7 X 10 ⁶	8.2 X 10 ⁶
White Ditch all	9.1 X 10 ⁸	4.79 X 10 ⁸	1.3 X 10 ⁹
Barret Ditch	3.8 X 10 ⁷	2.0 X 10 ⁷	5.8 X 10 ⁷
Ford Branch	5.4 X 10 ⁸	3.2 X 10 ⁸	6.9 X 10 ⁸
West Crockett	2.9 X 10 ⁷	1.5 X 10 ⁷	3.9 X 10 ⁷
Crockett Branch	9.0 X 10 ⁷	4.8 X 10 ⁷	1.2 X 10 ⁸
East Crockett	2.2 X 10 ⁸	1.4 X 10 ⁸	3.2 X 10 ⁸
Total amount of water recharged to the aquifer	7.8 X 10 ⁹	4.7 X 10 ⁹	1.0 X 10 ¹⁰
% of total amount diverted from the Walla Walla River	28%	17%	37%

Evaluation of Location of Artificial Aquifer Aecharge



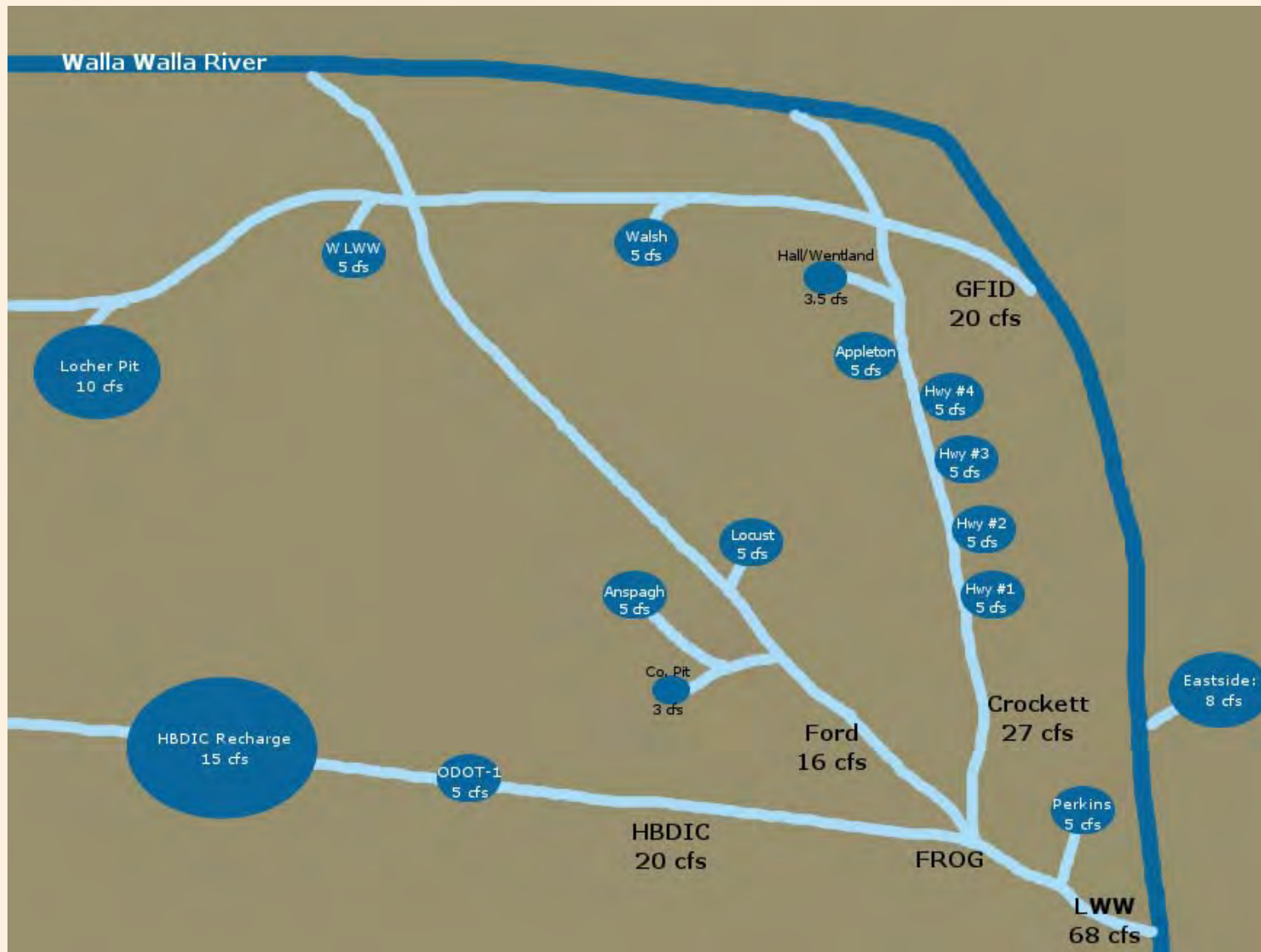
Para disminuir los efectos negativo del recubrimiento de canales. Se evalúa emplear la recarga artificial de acuíferos

Flujo mínimo necesario en el río Walla Walla

HBDIC Recharge Site Legal Diversion Periods	Minimum Walla Walla River Flow $Q_{\min}$
November 1st through November 30th	65 cfs (m^3/sec)
December 1st through January 31st	95 cfs (m^3/sec)
February 1st through May 15th	150 cfs (m^3/sec)

“These minimum instream flows were determined through the OWRD limited testing license process in 2004 in consultation with Oregon Water Resources Department (OWRD), Oregon Department of Fish and Wildlife (ODFW), Oregon Department of Environmental Protection (ODEQ) and the Confederated Tribes of the Umatilla Indian Reservation (CTUIR).” Bower (2009). Hudson Bay Recharge Testing Site Report

Lugares potenciales disponibles para MAR



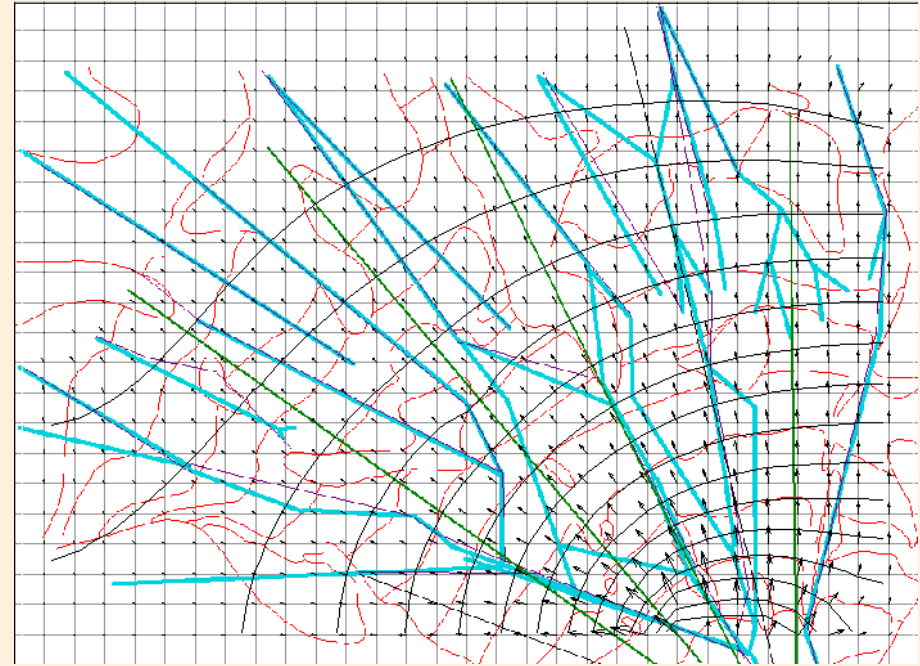
La primera evaluación es basada en el disponibilidad de tierra

Evaluación de Locaciones: Criterio sugerido de 5 etapas

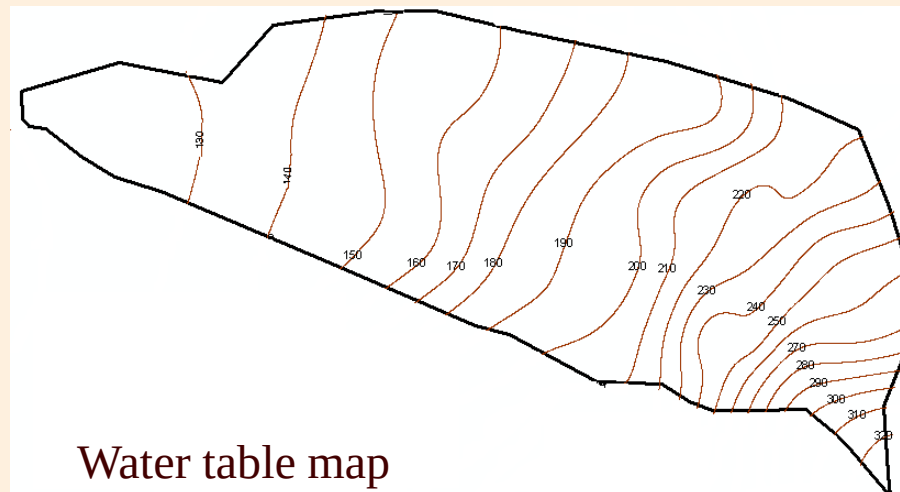
1. Estimar la distancia a un cuerpo frontera superficial de descarga (L_n)
2. Estimar la distancia de la superficie al agua subterránea (H)
3. El área disponible del proyecto (A)
4. Calcular la máxima recarga (Bouwer 1999)

$$H = \frac{iR^2}{4T} \left(1 + 2 \ln \frac{Rn}{R} \right)$$

5. Utilizar un modelo de la zona no-saturada como HYDRUS para simular la tasa de recarga real



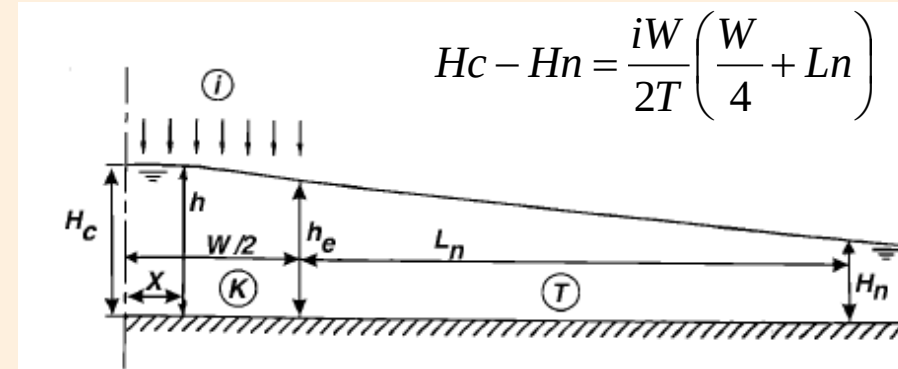
Vectors of groundwater show the direction



Water table map

Ejemplo de aplicación prueba piloto en Walla Walla

1. Distancia a los manantiales Johnson and Dugger Creek $L_n=1,600$ m
2. Distancia al agua superficial $H=14$ m
3. Área de las basijas $A=200 * 50$ equivalente radio de 56.5 m



Canales infinitos, Bouwer (1999)

$$H_c - H_n = \frac{iW}{2T} \left(\frac{W}{4} + L_n \right)$$

4. Resolvemos la ecuación para $i =$

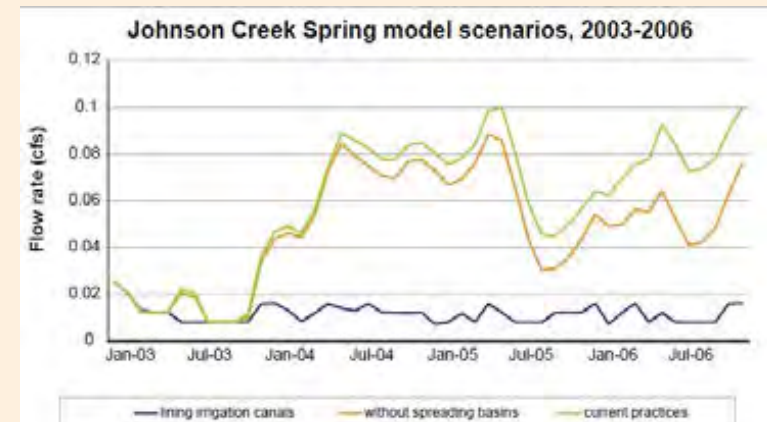
$$i = \frac{Q}{A} = \frac{4 * 30 * 60 * 14}{56.41^2} * \frac{1}{1 + 2 \ln \left(\frac{1600}{56.41} \right)} = 4.1(m/day)$$

$$4.1 * 10,000 = 41,200(m^3/day) = 17cfs$$

5. Simulaciones en HYDRUS y IWFEM

$$H_c - H_n = \frac{iR^2}{4T} \left(1 + 2 \ln \frac{Rn}{R} \right)$$

Teoría de flujo radial, Bouwer (1999)



El modelo de la zona no-saturada «Vadose zone»

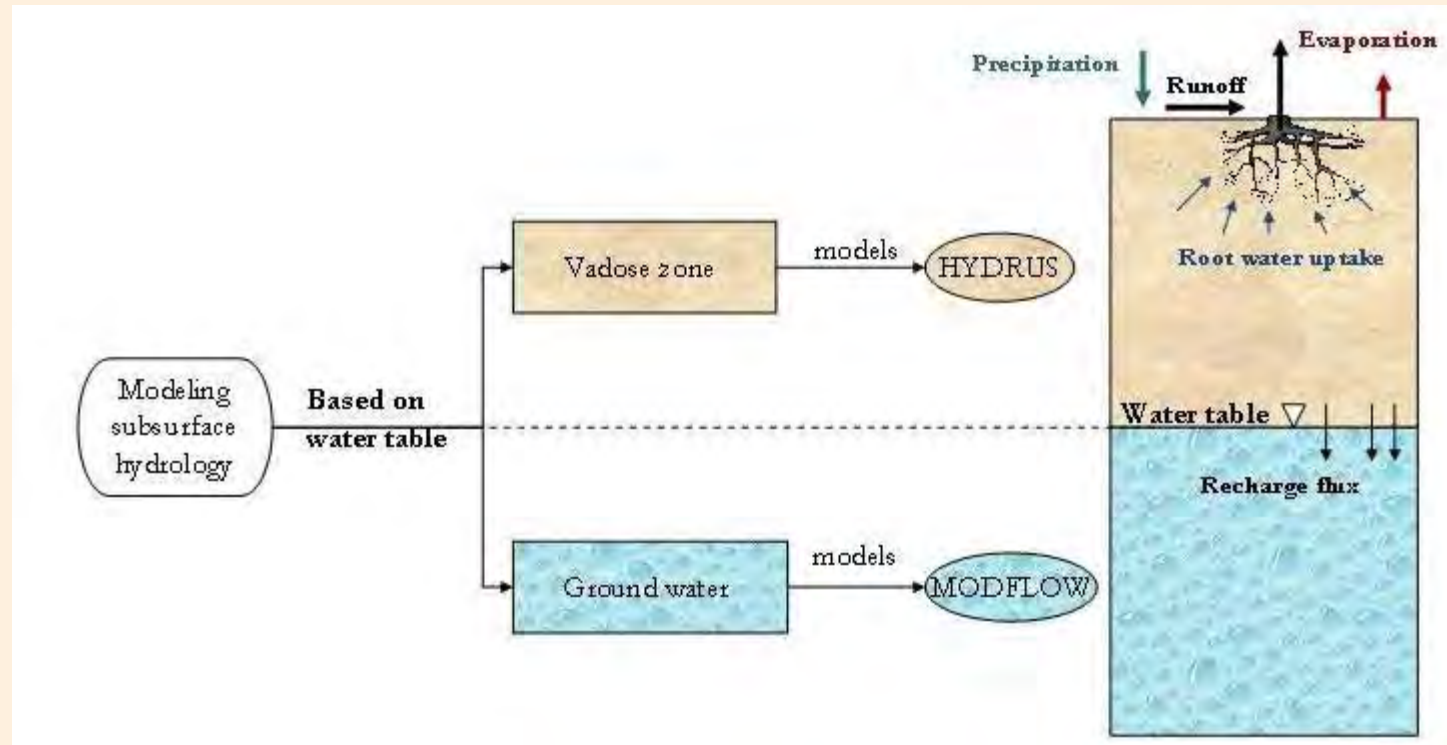
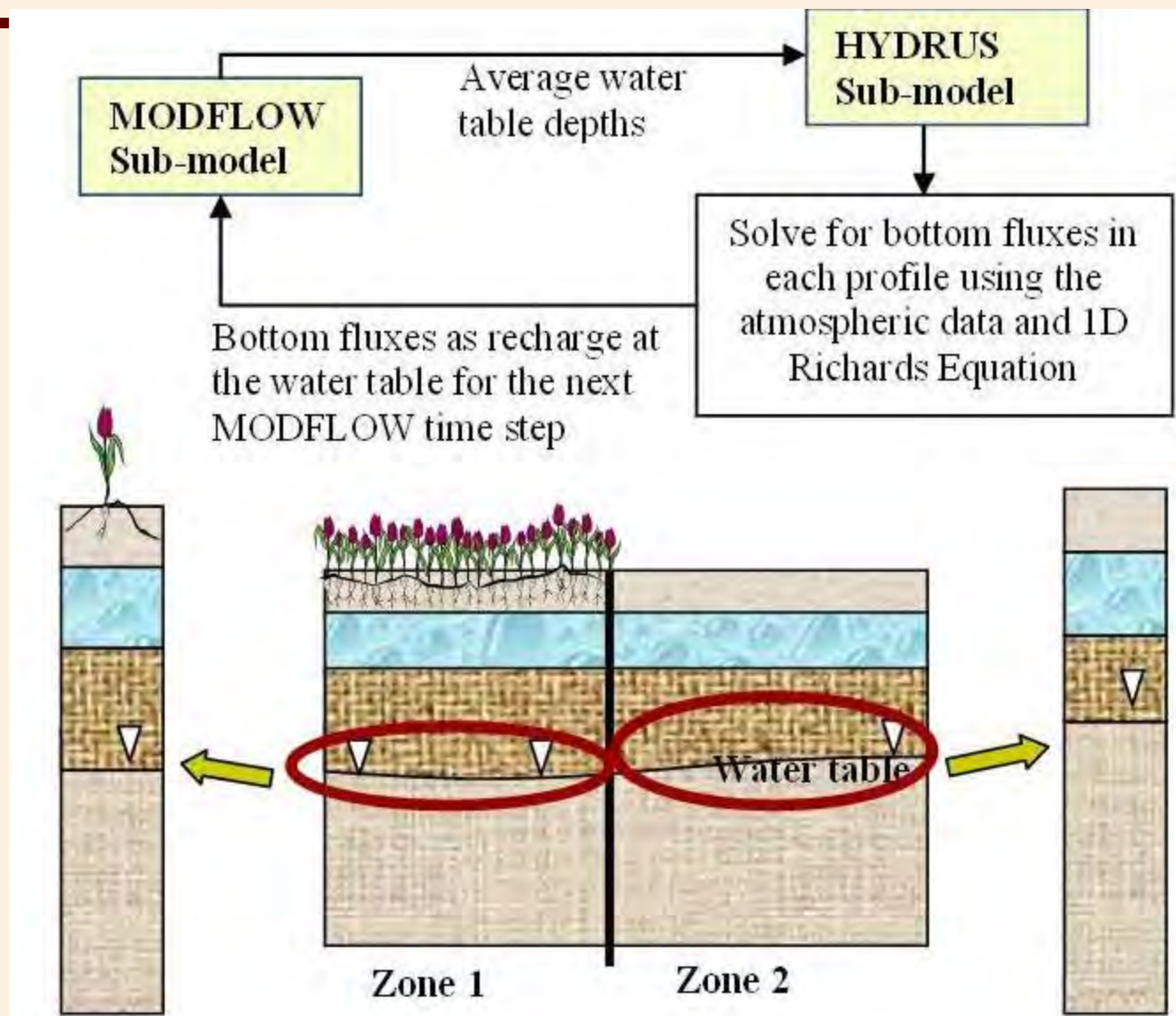


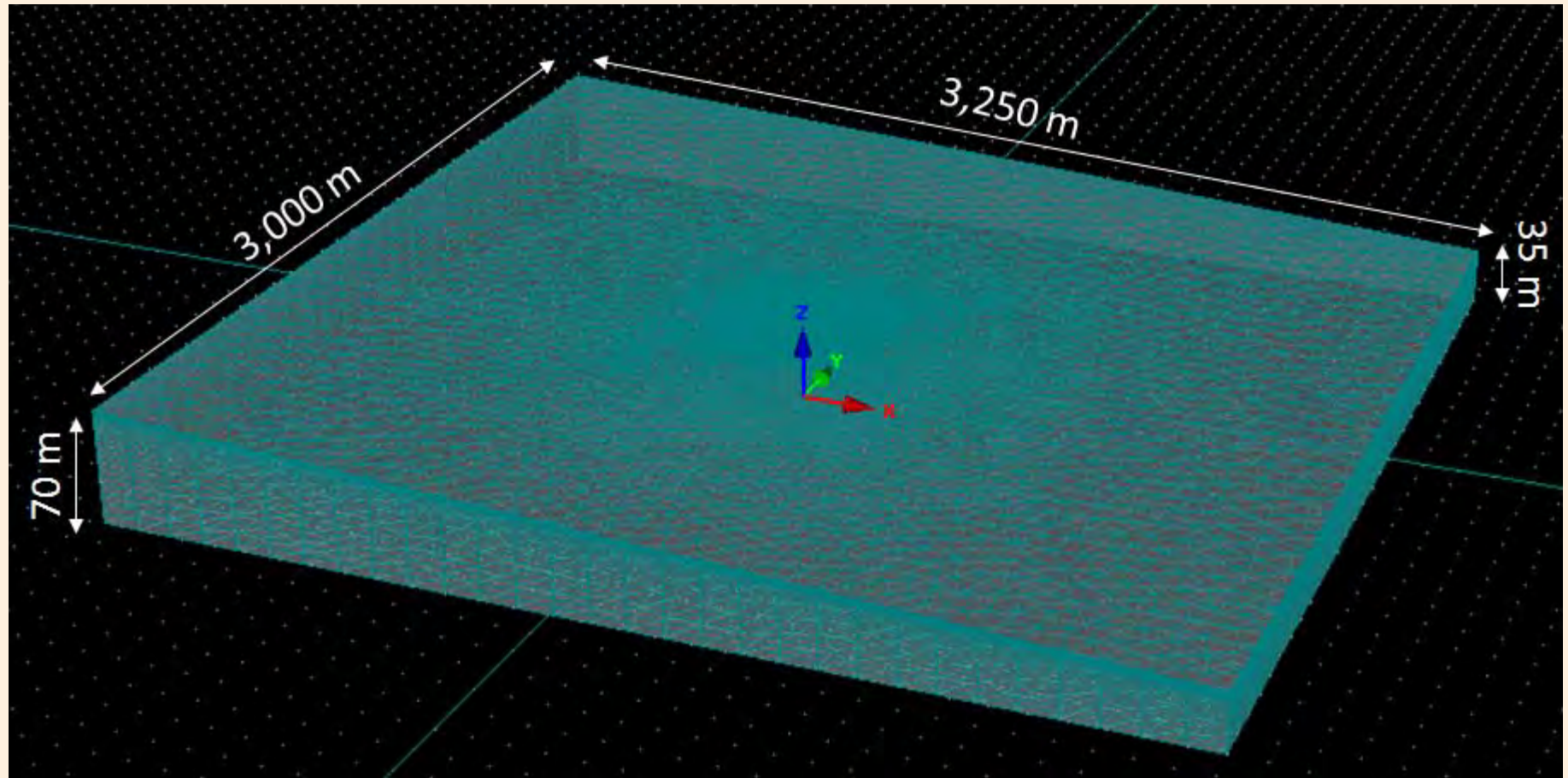
Diagrama proveniente de pc-progress

(a) HYDRUS sub-model (vadose zone) (b) IWFM sub-model (agua subterránea).



HYDRUS estima el flujo de recarga y IWFM estima la posición del agua subterránea. (Šimůnek et al., 2005)

Área del Modelo en HYDRUS



Las vasijas de infiltración están simuladas en el centro del modelo
Nodos variables: 2 m en el centro y 100 metros en la periferia del área del modelo.

Calibración con pureabas de rastreo



Siete robots de muestreo

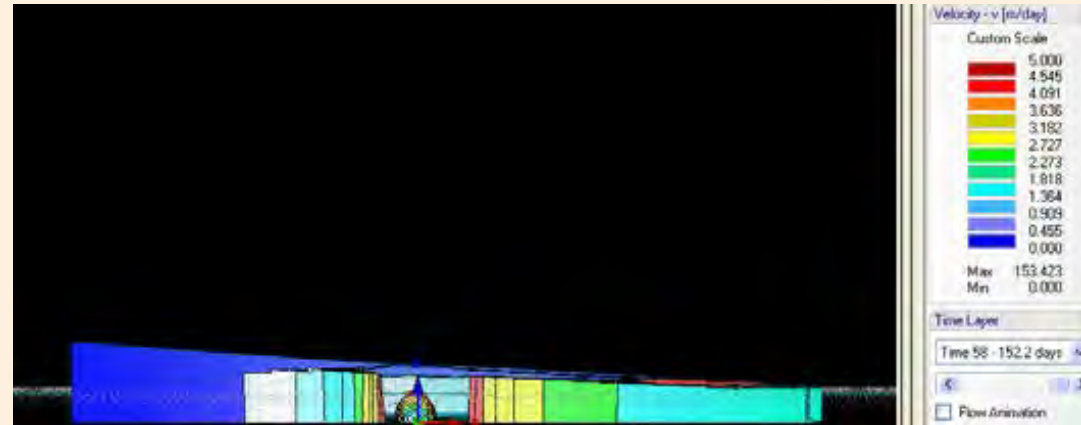
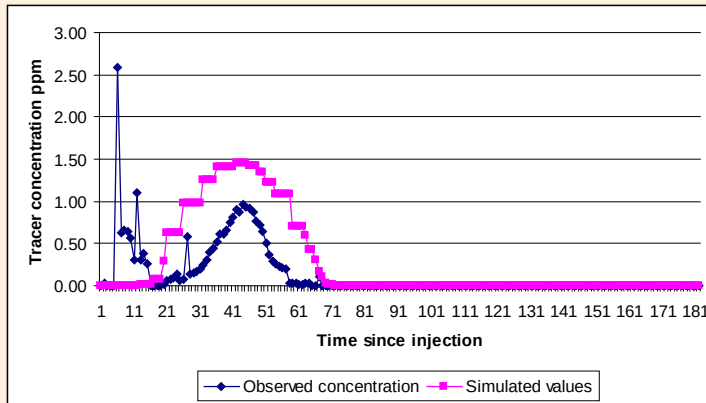
El objetivo es estimar la velocidad del agua subterránea y evaluar la conexión con los manantiales a 1.6 km

Rastreadores en recargas artificiales



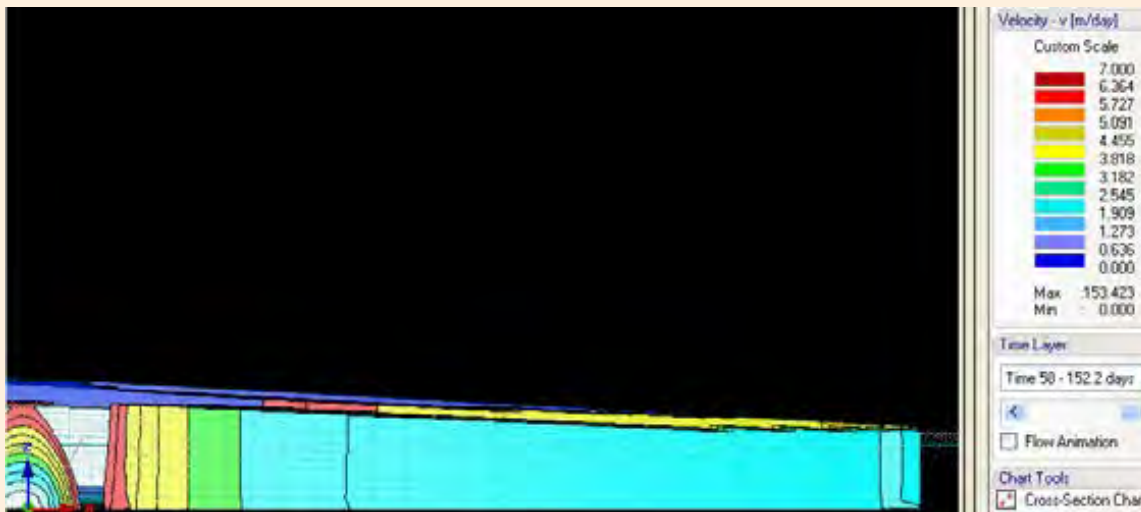
30kg de Potasio de Bromo inyectados a la misma tasa que las vasijas recargan el acuífero.

Resultados y explicación con ayuda de las simulaciones



Velocidad estimada de 60m/dia

Velocidades simuladas



La mayoría del agua de recarga fluye en la primera capa arriba del acuífero original

Conclusiones

- ❑ EL total derrame de los canales de irrigación es 14 millones m^3 per año, equivalente al 30% del agua que cargan los canales.
- ❑ Si los canales de irrigación son recubiertos la perdida de recarga es equivalente a 30 cm. Lo mismo que incrementar el bombeo del área 23%
- ❑ EL modelo presenta una opción transparente y objetiva para la selección de lugares de recarga artificiales.

Reconocimiento

Este proyecto agradece a las siguientes organizaciones por sus fondos a través del Walla Walla Basin Watershed

Council:

Oregon Watershed Enhancement Board

Washington Department of Ecology

Bonneville Power Administration