

Optimización para el Normado, Planeamiento, Diseño y Manejo del agua subterránea

RICHARD C. PERALTA

Laboratorio de Dinámica Hidráulica, Fundación de Investigaciones de la Universidad Estatal de Utah, Universidad Estatal de Utah, Logan, UT 84322-4105, USA

Correo electrónico: richard.peralta@usurf.usu.edu

Abstracto

Los modelos de Simulación/optimización (S/O) junta modelos de simulación y optimización para calcular estrategias óptimas para el manejo del agua subterránea ante problemas de optimización propuestos. Una estrategia es un conjunto de caudales de extracción e inyección de agua subterráneas distribuidas espacial y temporalmente. Los modelos S/O están llegando a ser más comúnmente usados para el desarrollo de normas, planeamiento, diseño del sistema y manejo. Por ejemplo, los encargados del manejo y planificación del agua algunas veces deben decidir como controlar el uso del agua subterránea para originar un futuro favorable y evitar serios problemas. Los modelos S/O pueden ayudar a determinar las normas, el sistema de bombeo del pozo y las estrategias de manejo las cuales pueden producir los mejores resultados. 'Lo mejor' es definido por el gerente/programador en términos de disponibilidad de agua, sostenibilidad, producción del cultivo, criterio económico, social y ambiental y las combinaciones de estos. Dirigir problemas de optimización de múltiples objetivos y el desarrollo de curvas cuantificadas de oferta-demanda es fácil con un poderoso modelo S/O tal como el SOMOS. Los ejemplos demuestran el efecto del modelo S/O para el normado y desarrollo de planes, diseño del sistema y manejo.

Palabras claves: manejo; agua subterránea; conjuntivo; optimización; simulación/optimización; S/O; planeamiento; ley de agua; derechos de agua; SOMOS; desarrollo de normas; diseño; pozos; calidad de agua; producción sostenida.

INTRODUCCION

Los modelos de simulación de Agua Subterránea son útiles para predecir el sistema físico de respuesta a los estímulos. Los estímulos incluyen la recarga y el caudal de bombeo del agua subterránea. Algunos estímulos son manejables y otros no. El modelo de simulación y optimización (S/O) asiste para la determinación de los estímulos manejables de mayor valor (la mejor estrategia de bombeo). Un modelo S/O puede determinar como maximizar el logro de los objetivos de manejo

de uso especificado, sujetos a restricciones específicas. Un modelo S/O junta: un modulo de simulación que puede predecir las consecuencias del manejo; y un modulo de optimización que puede calcular la mejor estrategia de manejo matemáticamente para un problema de manejo propuesto.

Un modelo S/O directamente calcula matemáticamente la mejor (óptima) estrategia de manejo para un problema de manejo propuesto por el usuario. Una estrategia de bombeo (manejo de agua subterránea) es un conjunto de caudales de extracción de agua del acuífero distribuidas espacialmente y posiblemente en forma temporal.

El uso del modelo S/O difiere del uso de los modelos de simulación normal (denominado aquí modelo S), tales como MODFLOW y MT3DMS. Los modelos S predicen como el sistema físico modelado responderá a una estrategia ingresada por el usuario. Los modelos S no están diseñados para analizar las estrategias de manejo óptimas. Usando estos modelos para estos fines se requiere de tediosos tanteos los cuales producirán solamente la mejor estrategia para simples problemas.

Los modelos S/O incorporan los modelos S o sustitutos para hacer posible predecir sistemas de respuesta al manejo. Un modelo S/O es solamente apropiado para predicciones como la del modelo S que esta incluye.

Los modelos S/O para simples situaciones de campo emplean ecuaciones analíticas para simuladores, y generalmente utiliza algoritmos para la investigación de operaciones clásicas en la optimización. Ecuaciones analíticas son usadas cuando la simplicidad del problema o las capacidades disponibles no justifican el uso de los modelos numéricos S (diferencia finita o elemento finito). Peralta y Wu (2004) describen las aplicaciones de los modelos S/O para ciertas escalas de explotación de agua subterránea y problemas de manejo de agua de uso conjuntivo.

Los modelos S/O para acuíferos o agua subterránea regional o el planeamiento del uso conjuntivo de agua subterránea requieren modelos numéricos S de flujo como simuladores. Peralta y Shulstad (2004) describen la evaluación de alternativas para el normado del agua para diferentes hidrogeologías y escenarios legales-institucionales.

Para diseñar óptimamente el bombeo y tratamiento (PAT) de los sistemas de remediación de agua subterránea contaminada, los modelos S/O requieren modelos numéricos de flujo y transporte. Peralta (2001) y Peralta et al (2003) listan ejemplos de remediación de agua subterránea contaminada, usando el código SOMOS (SSOL, 2001; Peralta, 2003). Este sistema de bombeo y tratamiento puede incluir docenas de extracciones en pozos para remover el agua contaminada antes del tratamiento.

Peralta (2001) y Peralta et al (2003) describen numerosas comparaciones directas entre diseños desarrollados vía el modelo S/O versus los diseños preparados simultáneamente por el

modelo S de tanteos. En todos los casos, el modelo S/O produce diseños superiores, generalmente mejores en 20% aproximadamente, pero en algunos casos es mayor en un 50%.

En resumen, los modelos S/O son útiles para un rango de agua subterránea y para una configuración de manejo de agua de uso conjuntivo. Aquí describimos tres configuraciones: (a) situaciones en las que se haya limitado los datos de campo, simulación apropiada para una ecuación analítica; (b) situaciones en las que se requieren un modelo numérico de flujo; y (c) sitios contaminados que requieren un modelo numérico de flujo y transporte. Respectivamente, los tres ejemplos usan los modelos de Simulación/Optimización SOMOA, SOMO1, y SOMO3 del Sistema de Modelo Simulación/Optimización (SOMOS), (SS/OL y HGS, 2001; Peralta, 2003).

USO CONJUNTIVO EN SISTEMAS SIMPLES DE ACUIFERO-RIVERA

Este ejemplo ilustra el uso máximo conjuntivo del agua subterránea extraída y del agua superficial desviada mientras que se alcanza la apropiada salinidad para el agua de riego (Peralta, 1999). El modelo S/O usa ecuaciones analíticas e integrales de circunvolución para simulación y algoritmos simplex para optimización.

Asumiendo que un agricultor extrae agua subterránea usando un pozo y también desviando el agua desde un arroyo (ambas ubicadas en su finca). El desea maximizar la cantidad total de agua subterránea más el agua de superficie que es entregada a su cultivo durante un periodo de dos meses. Sin embargo, para asegurar que el flujo de agua del arroyo que parte desde su finca es adecuado para los usuarios aguas abajo, el no debe reducir el flujo de agua en mas de $11,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ($385,000 \text{ ft}^3 \text{ d}^{-1}$) al final del día 30, o en mas de $11,500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ($402,500 \text{ ft}^3 \text{ d}^{-1}$) al final del día 60. Las máximas capacidades del pozo y del agua que fue desviada son cada una de $8,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ($280,000 \text{ ft}^3 \text{ d}^{-1}$). La mayor cantidad de agua que su cultivo puede usar razonablemente es de $13,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ($455,000 \text{ ft}^3 \text{ d}^{-1}$) para el primer mes y $16,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ($560,000 \text{ ft}^3 \text{ d}^{-1}$) para el segundo mes.

Otra información (incluyendo la ubicación x, y en metros) es:

- Río que recorre desde el Noroeste al Sureste (100,1000) hasta (800, 0)
- La ubicación de la diversión de agua esta en (200,858)
- Pozo de Agua Subterránea (0.2 m de radio), ubicado a los (450, 850)
- Conductividad es 80 md^{-1}
- La elevación de la superficie del terreno es 45 m, y la superficie potenciométrica esta inicialmente a un equilibrio de 40 m. Espesor saturado es de 40 m.
- Por sostenibilidad, (basado en el cultivo, suelo, y salinidad del agua superficial y del agua subterránea) al menos 60 % del agua usada durante un mes debe provenir de un

río, y al menos el 48% del total de agua otorgada durante los dos primeros meses deberá provenir del río. La primera restricción protege a las semillas durante la germinación. La segunda restricción provee adecuada lixiviación para prevenir la salinidad constituida en la zona de la raíz.

Para determinar la estrategia de máximo uso conjuntivo de agua, sujeto a restricciones, uno puede usar el SOMOS modelo SOMOA (Peralta y Wu, 2004). (SOMOA es el sucesor del CONJUS). En el uso del SOMOA uno podría especificar: Opciones A y B; una extracción del pozo; una diversión; dos periodos de treinta días de estrés; límite máximo de $8,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ en cada periodo de bombeo y diversión; un límite mínimo de 0.6 de la proporción de la calidad de agua $\{\text{diversión}/(\text{diversión} + \text{extracción de bombeo})\}$ por un periodo 1; un límite mínimo de 0.48 de esa proporción para un total de dos meses; el límite máximo de agotamiento del flujo del río de 11,000 y $11,500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, respectivamente; y límite superior de 13,000 y $16,000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ en bombeo mas diversión.

La tabla 1 muestra la estrategia óptima calculada del uso conjuntivo y las respuestas en estado variable. Las ajustadas restricciones son de dos meses de bombeo de agua subterránea, agotamiento del río en ambos meses, la proporción de la calidad del agua por un mes, y la proporción de la calidad del agua por toda la temporada. Expandiendo cualquier ajustada restricción (por ejemplo, disminuyendo la proporción requerida del agua superficial) permitiría al optimizar aumentar el total del agua proporcionada.

Tabla 1. Estrategia óptima del uso conjuntivo y sistema de respuestas.

	Período 1	Período 2	Promedio de la temporada.
Bombeo del agua subterránea, (GP), [$\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$]	4,774	8,000	
Diversión del agua superficial, (SD), [$\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$]	7,001	4,573	
Agotamiento del flujo del río, [$\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$]	11,000	11,500	
Total de Agua otorgada, GP + SD, [$\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$]	11,774	12,573	12,174
Proporción de la calidad del agua, $\{\text{SD}/(\text{SD} + \text{GP})\}$	0.6	0.36	0.48

PLANEAMIENTO DE UNA PRODUCCION SOSTENIDA DEL ACUIFERO CON RESTRICCIONES DE AGOTAMIENTO DEL RIO

Este ejemplo enfatiza la maximización del uso sostenido del agua subterránea sin dañar los existentes ecosistemas y los derechos legales del agua superficial (Das, 2002; Das et al, 2004). El modelo simulador S/O empleado es MODFLOW, y el agente optimizador es un algoritmo simplex. Estos están incluidos dentro del SOMO1 modelo del SOMOS.

Los 113 por 26 Km. (70 por 16 millas) del área del Valle de Cache y del acuífero está en el noreste de Utah y el sureste de Idaho (Figure 1). La mayor parte del agua superficial, la principal fuente para el riego, se origina en los nevados. El agua subterránea resulta de las lluvias, percolación profunda del riego, y de la filtración de las aguas superficiales. Los pozos proveen de agua para el uso domestico, industrial, publico y riego.

El bombeo de agua subterránea reduce el flujo de agua superficial. Los derechos legales de agua superficial y la protección ambiental limitan cuanta agua subterránea puede ser usada. Uno evalúa diferentes formas de maximizar el uso sostenible de agua subterránea bombeada presentando la optimización de diversos grupos de escenarios. Las estrategias óptimas resultantes son evaluadas con respecto a las cargas de agua y a los flujos los cuales resultarían de un continuo bombeo desde 1990 (llamados “antecedentes de caudales de bombeo”) en un estado constante. El continuo bombeo de 1990 hacia en un estado constante es el de un ‘escenario inmanejable’.

Por lo tanto, en la figura 2 se muestra la diferencia en flujos entre un escenario inmanejable y algunos escenarios optimizados del grupo A. Los escenarios del grupo A maximizan el abastecimiento sostenido del agua subterránea a 18 ciudades usando un nuevo sitio de pozo candidato para cada ciudad sujeto a: (a) la carga en nuevas celdas de bombeo no puede disminuir mas de 9 m (30 pies) en capas de 1-4; (b) los manantiales continúan fluyendo donde ellos fluyen en 1990 y el inmanejable escenario; (c) la filtración saturada del acuífero-río continua donde ello ocurre en 1990 y el inmanejable escenario; y (d) la filtración total del acuífero hacia el río no puede disminuir por mas del 10 %.

Los resultados del grupo A muestran que el bombeo sostenible puede aumentar 113-556 litros por segundo (4-20 cfs) por encima de los caudales anteriores. Otros escenarios mostraron que aun con mayores restricciones de agotamiento del río, es posible algunos incrementos de bombeo de agua subterránea sostenible. Tales resultados alientan a la oficina del ingeniero de estado para expandir el plazo para el desarrollo del agua subterránea.

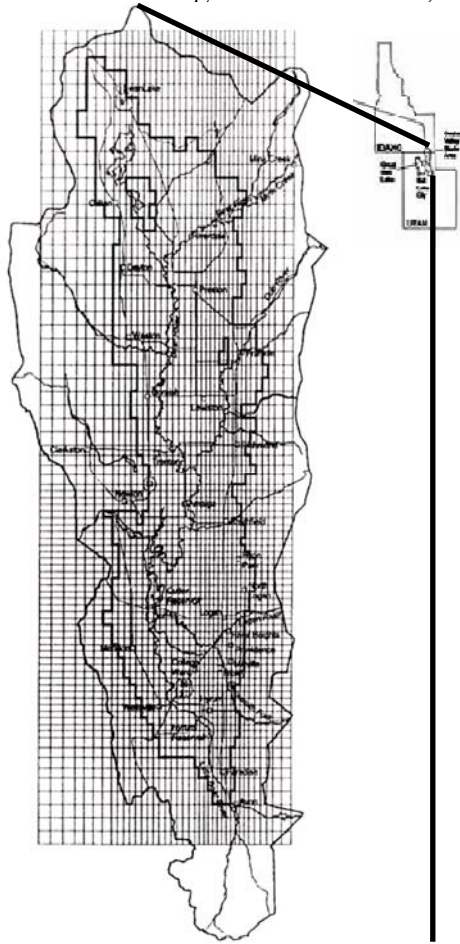


Fig 1 Ubicación del Valle de Cache en Utah y Idaho y la cuadrícula modelo de agua subterránea (Kariya, et al., 1994).

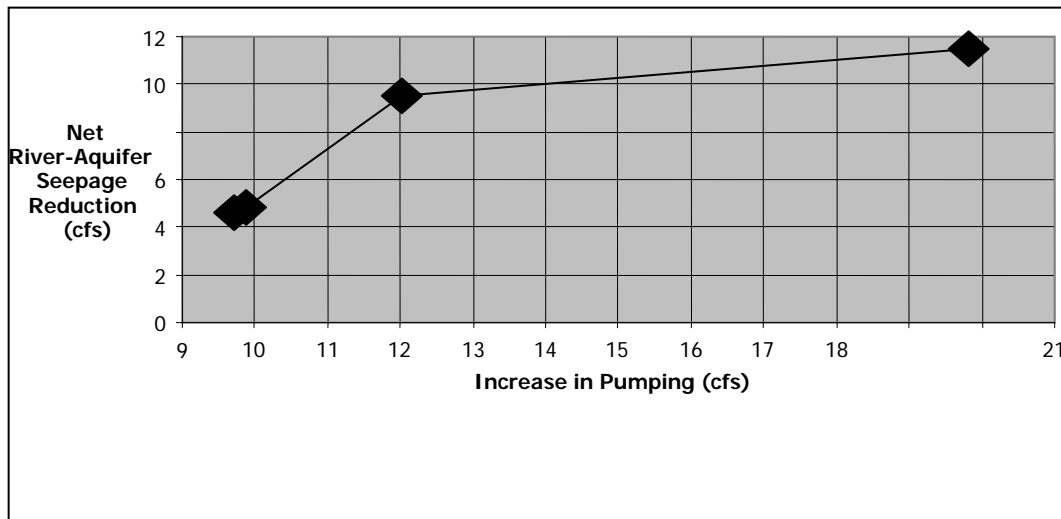


Fig. 2. Curva de oferta-demanda del incremento de bombeo del agua subterránea versus la disminución de la infiltración neta del río-acuífero. (Para convertir de cfs a m^3s^{-1} multiplicar por 0.0283.)

REMEDIACION DE LA CONTAMINACION DEL ACUIFERO COMPLEJO

Esto ilustra el uso de flujo numérico de agua subterránea y simuladores de transporte de contaminantes, simuladores neurales de red artificial, y optimizadores heurísticos (HOs). Los HOs usados fueron algoritmos genéticos (GA), annealing simulados (SA), y tabu search (TS).

El ejemplo es del trabajo realizado por Peralta et al (2002) optimización PAT diseñado para contener y remover 7.5 millas (12 km.) de tricloroetileno (TCE) y trinitrotolueno (TNT) en la estación Blaine Naval Ammunition (NAD), en Hastings, Nebraska. En la figura 3 se muestra el centro del área de estudio de 134 millas cuadradas (347 km²). La celda modelo numero 66,912 requirió 1.5 horas para una simulación en MODFLOW y MT3DMS. Ellos solucionaron la optimización de tres problemas formulados requiriendo la determinación de estrategias óptimas de bombeo para 12 a 25 pozos y seis periodos de cinco años simultáneamente.

Dentro de los tres meses ellos desarrollaron estrategias optimas para las tres formulaciones usando el modelo SOMO3 de SOMOS, (SSOL y HGS, 2001). Simultáneamente, un experimentado equipo de consultores utilizó los mismos modelos de simulación MODFLOW y MT3DMS y el modelo de tanteo S normal para el diseño de estrategias para los mismos problemas. Ambos equipos usaron un post-procesador para calcular el valor de la función objetivo y evaluar los resultados.

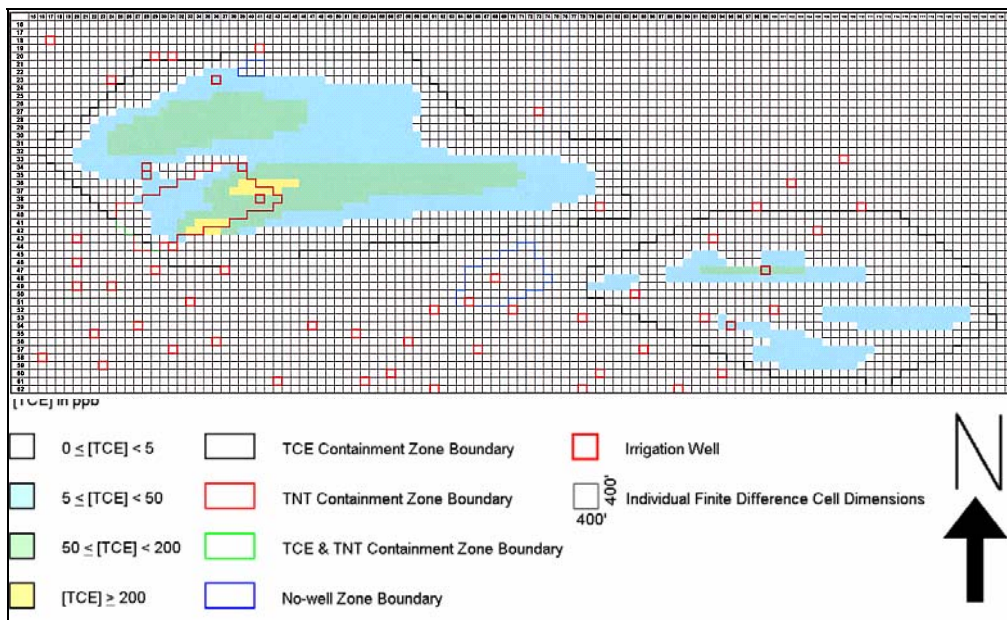


Fig. 3. Concentraciones iniciales de TCE excediendo (simulado el 1 de Enero de 2003) 5.0 ppb en la capa 3, y parte de la diferencia de la cuadrícula finita (Peralta et al., 2003, 2004). (Para convertir de pies a metros multiplicar por 0.3048 m.)

La figura 4 muestra la formulación del problema 1. SOMOS-el cual desarrollo estrategias que fueron 20-33 % mejores para todas las formulaciones que los diseños desarrollados al tanteo. Esto es representativo para 8 sitios del cual nuestro S/O desarrolló estrategias que fueron comparadas con diseños de tanteo, las estrategias de S/O son generalmente entre 20-40 % mejores. (Peralta 2001b Peralta, 2003; Peralta et al, 2003).

Formulación 1 minimiza costo de Limpieza:

MINIMIZAR Σ

{ Costo capital de pozos (\$400K); tratamiento (\$1.0K gpm⁻¹); tubería (\$1.5K gpm⁻¹) }+ {Costos Fijos: Manejo, Operación y Mantenimiento (\$115K año⁻¹); análisis y muestreo (\$300K año⁻¹) }+{Costos Variables: electricidad (\$0.046K gpm⁻¹); tratamiento (\$0.283K por gpm⁻¹); descarga (\$0.066K gpm⁻¹) }

SUJETO A:

- Celdas de la capa 1 y 2 no permiten estar secas
- 350 gpm límite de extracción por pozo por capa; no inyección
- No remediación de pozos en la capa 6, áreas restringidas o pozos para riego
- Concentraciones no pueden exceder la concentración límite (CLs) fuera de las zonas contaminadas al final de cualquier MP, (CL_{TCE} = 5ppb, CL_{TNT} = 2.8 ppb)
- Limpieza a los CLs debe ser ejecutada dentro de los 30 días para las capas 3-6

Fig. 4. Formulación Blaine NAD 1 optimización de problema. (Multiplicar gpm⁻¹ by 264 para obtener m³ min⁻¹).

RESUMEN

Los modelos de Simulación/Optimización esta convirtiéndose mas flexibles y poderosos, liderando hacia el incremento del uso para ayudar en el desarrollo de políticas de agua, planeamiento, diseño y manejo de sistemas. Diferentes tipos de aproximaciones de simulación y optimización son mejores para diferentes situaciones y manejo de problemas.

Para configuraciones de campo donde ecuaciones de flujo analítico son apropiadas un modelo S/O como el SOMOA puede diseñar prontamente óptimas estrategias de manejo. SOMOA emplea ecuaciones analíticas y de superposición como simuladores e investigaciones de optimizadores de operaciones clásicas (simplex, branch y bound, y gradiente de búsqueda de algoritmos).

Para acuíferos heterogéneos describibles vía modelos de flujos numéricos, la optimización también puede ser generalmente presentada usando algoritmos de optimización clásica. El SOMOS modelo SOMO1 es apropiado para sistemas de acuífero y acuífero-río.

Para acuíferos contaminados donde las concentraciones deben ser variable de estado manejable, es usualmente mejor emplear flujo numérico y simuladores de transporte y optimizadores heurísticos. El SOMO3 modelo de SOMOS es aplicable para la mayoría de tales sitios.

Diseños y estrategias de manejo desarrolladas usando los modelos S/O son usualmente alrededor del 20-40 % mejor que aquellas desarrolladas usando el tanteo con modelos de simulación solos. Esto es porque los modelos de simulación son diseñados solamente para predecir sistemas de respuestas a los estímulos, pero los modelos S/O son diseñados para desarrollar soluciones óptimas a problemas especificados por el usuario.

SOMOS permite una fácil preparación de las curvas Oferta Demanda para evaluar el efecto de las restricciones de los valores de la función objetivo y para dirigir problemas de optimización multi-objetivos. Esto es importante porque muchos problemas de manejo de agua son multi-objetivos. Por ejemplo, las curvas Oferta Demanda pueden mostrar como usar el agua subterránea para lograr la mejor combinación de apoyo sostenible a la población, producción del cultivo y protección del ecosistema.

Agradecimientos Muy agradecido por el apoyo brindado con; el Condado de Cache, R. Das, J. Escurra, I. Kalwij, B. Timani, S. Wu, Comisión de Desarrollo Económico de Utah, Estación Experimental de Agricultura de Utah.

REFERENCIAS

- Das, R. 2002. Planning sustainable optimal groundwater yield for the Utah part of Cache Valley. Irrigation Eng. MS thesis. Utah St. Univ., Logan, UT. 115 p.
- Das, R., Peralta, R. C., and B. Timani. 2004. Cache Valley: optimizing sustainable water use and ecosystems while considering water rights. In Proceedings of EWRI 2004 World Congress.
- Kariya, K.A., M.D. Roark and K.M. Hanson. 1994. "Hydrology of Cache Valley, Cache County, Utah and adjacent part of Idaho, with emphasis on simulation of ground-water flow," Tech.Pub., 108, Utah Dept. of Natural Rsrcs. 120p.
- Peralta, R.C. 1999. Conjunctive Use of Ground Water and Surface Waters for Sustainable Agricultural Production. FAO of the United Nations Consultancy Report. 158p
- Peralta, R. C. 2001. Remediation simulation/optimization demonstrations. In Proceedings of MODFLOW and Other Modeling Odysseys. 2001. Eds, Seo, Poeter, Zheng and Poeter, Pub. IGWMC. p. 651-657.
- Peralta, R. C., Kalwij, I. M., and S. Wu. 2002. Optimal P&T designs for Blaine Naval Ammunition Depot. Sep 2002. Project completion report for Navy. Systems Simulation/Optimization Laboratory, Biological and Irrigation Eng. Dept., Utah State University. 36 p.
- Peralta, R. C. 2003. SOMOS Simulation/Optimization Modeling System. In Proc., MODFLOW and More 2003: Understanding through Modeling, IGWMC, Golden, CO. p 819-823.
- Peralta, R. C. and R. Shulstad. 2004. Optimization modeling for groundwater and conjunctive use water policy development. In Proceedings of FEM-MODFLOW International Conference, IAHS, Karlovy Vary, Czechoslovakia, Sep, 2004.
- Peralta, R. C. and S. Wu. 2004. Software for Optimizing International Water Resources Management. In Proceedings of EWRI 2004 World Congress, ASCE, Salt Lake City, U.S.A. Jun, 2004.
- Peralta, R. C., Kalwij, I. M. and S. Wu. 2003. Practical simulation /optimization modeling for groundwater quality and quantity man. In MODFLOW & More 2003: Understanding through Modeling, IGWMC, Golden, CO., p 784-788.
- Systems Simulation/Optimization Lab. and HydroGeoSystems Group. 2001. Simulation/Optimization Modeling System (SOMOS) users manual. SS/OL, Biological and Irrigation Eng. Dept., Utah State Univ., Logan, Utah. 457 p.