

PRÁCTICA FINAL TEORÍA DE SISTEMAS



Universidad Rey Juan Carlos (CGIS)

Campus Manuel Becerra

**Profesor: Francisco José Soltero
Domingo**

Alumno: Alejandro Rodríguez Saavedra

a.rodriguezsaa.2025alumnos.urjc.es

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	3
ESTADO DEL ARTE.....	4
OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
METODOLOGÍA	6
CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO	7
Enunciado	7
Diagrama de Forrester	8
Diagrama en Vensim	9
Simulaciones	9
Decisiones	11
RESULTADOS Y EVALUACIÓN	13
CONCLUSIONES.....	13
BIBLIOGRAFÍA APA	14

Ilustración 1: Periodo de retorno de un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia en función del área de captación (Imteaz el al., 2021).....	5
Ilustración 2: Diagrama de Forrester	8
Ilustración 3: Gráficas sobre Depósito agua lluvia y Lago	9
Ilustración 5: Flujos de entrada y salida de Depósito agua lluvia y Lago	10

INTRODUCCIÓN

La administración del agua es fundamental para la productividad de los cultivos de regadío, ya que la disponibilidad del agua varía en función de los cambios estacionales que pueden provocar sequías. Para asegurar que haya riego, se suelen combinar diferentes fuentes de abastecimiento e incluso se establecen reglas de prioridad para disminuir la dependencia hacia los productos externos.

Este trabajo se basa en un sistema de suministro de agua para el regadío basado en un depósito de agua de lluvia y un lago. El depósito almacena agua que viene de las lluvias, y el lago se utiliza como fuente secundaria en el caso de que el depósito de lluvia quede completamente vacío. Además, el sistema abarca perdidas naturales en el lago principalmente por fenómenos como los desagües o evaporaciones, por lo que principalmente se utilizará el agua del depósito de agua de lluvia, hasta que se acabe y se tenga que recurrir al agua del lago.

Para analizar el comportamiento del sistema ante condiciones desfavorables, se elabora un modelo de dinámica de sistemas utilizando el diagrama de Forrester puesto en práctica en Vensim. Se ejecutarán simulaciones en distintos contextos utilizando el modelo matemático para examinar la evolución a lo largo del tiempo de los volúmenes almacenados y determinar la dependencia del lago como “backup”(respaldo). Para concluir, se sugerirán decisiones relacionadas con la mejora y vinculadas con la captación, almacenamiento y demanda del agua, analizando su repercusión en la sostenibilidad del suministro.

ESTADO DEL ARTE

Tener agua disponible es un elemento fundamental para que la agricultura sea productiva. En los sistemas de riego, si se gestiona el flujo de manera eficiente, se disminuyen las vulnerabilidades en épocas de escasez y se optimiza la sostenibilidad del sistema. La planificación del riego tiene en cuenta normalmente la demanda del agua de las cosechas y la oferta existente, que puede cambiar por condiciones meteorológicas y estacionalidad. (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2012)

La fusión de fuentes de almacenamiento y suministro es una táctica común para elevar la resiliencia. El almacenamiento hace posible que la disponibilidad de agua no deba depender completamente de la demanda, ya que puede almacenar contribuciones como la lluvia y liberarlas cuando ya no sean necesarias para el riego. No obstante, las pérdidas naturales como evaporaciones afectan también a los depósitos y producen una disminución en la cantidad de agua disponible, suele pasar en temporadas cálidas. (FAO, 2012)

Es habitual utilizar políticas prioritarias cuando hay diversidad de fuentes: primero se emplea la considerada más apropiada, como en este caso el agua de la lluvia almacenada y únicamente se recurre a otra fuente diferente, cuando la primera no ha sido capaz de satisfacer toda la demanda, como en este caso se depende del lago en el momento que no hay posibilidad de usar más el depósito de agua de lluvia. Estas reglas hacen posible la disminución de presión sobre recursos más escasos y simplifica el análisis de dependencia en cuanto a las fuentes de respaldo. El comportamiento general de estos sistemas está determinado por el balance entre entradas, salidas naturales y consumo relacionado con el riego. No obstante, para el análisis de sistemas dinámicos que poseen acumulaciones y flujos, la dinámica de sistemas proporciona un marco apropiado ya que permite representar tasas y almacenamientos, incluir normas de decisión y simular diversidad de escenarios para medir la solidez del suministro. (Sterman, 2000)

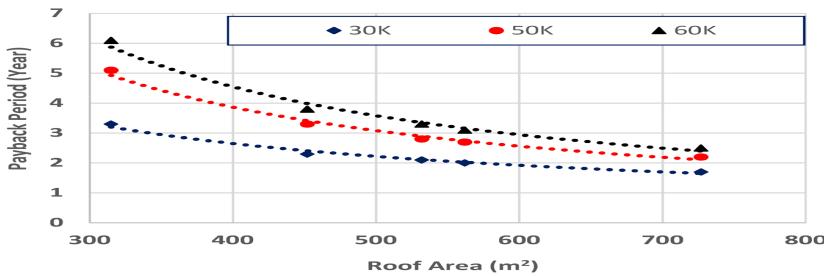


Ilustración 1: Periodo de retorno de un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia en función del área de captación (Imteaz et al., 2021).

La gráfica representada enseña el periodo de retorno sobre un sistema de aprovechamiento de agua relacionado con la capacidad de captación acompañado del coste inicial. Se observa que el periodo de amortización incrementa cuando las inversiones son más altas, mientras que cuando aumenta la captación, el periodo de retorno disminuye. Esta conducta es consistente con el método propuesto en el modelo, priorizando el uso del depósito de agua de lluvia, se consigue lograr un almacenamiento más grande que satisface gran parte de la demanda disminuyendo la dependencia del lago como fuente secundaria. Económicamente, el ahorro potencial es mayor año tras año a medida que el volumen de agua proporcionado por el depósito es más grande, por lo que se necesita menos tiempo para la recuperación de la inversión.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

El propósito principal que tiene este trabajo es el uso de la dinámica de sistemas para modelar y examinar el abastecimiento de agua para un cultivo de regadío que utiliza un lago como fuente secundaria y un depósito de agua de lluvia como fuente principal. Se realizará mediante la determinación del sistema y sus limitaciones reconociendo los componentes clave participantes en el suministro del agua (almacenamientos, entradas, salidas y demandas). Después se realizará el diagrama de Forrester utilizando los niveles, variables y flujos seguido del modelo matemático vinculado al diagrama de Forrester, incluyendo ecuaciones, niveles y normas de decisión. Tras haber finalizado estos procesos y comprobado que el modelo funciona correctamente, se implementará en Vensim para estudiar su comportamiento a través de simulaciones que examinan la evolución del volumen de agua almacenado en el depósito de lluvia y el lago. Finalmente, se analizará el impacto de la sostenibilidad del sistema para tener en cuenta mejoras para la captación, el almacenamiento o demanda de agua.

METODOLOGÍA

Para el análisis y desarrollo del sistema de suministro de agua se utiliza la metodología de la dinámica de sistemas, desde identificar el problema hasta la simulación y valoración de los escenarios. Principalmente se busca la meta del modelo, que componentes son incluidos, cantidad de agua disponible en el depósito o lago, y la capacidad para cubrir la demanda del riego.

Para conceptualizar el sistema primero se localizan los niveles, que pueden ser uno o varios, y en este caso se tratan del depósito de agua y el lago, por lo que son dos niveles. Después se localizan los flujos de entrada y salida relacionados con cada nivel, sea entrada y salida de depósito de agua de lluvia o entradas y salidas del lago. Por último, se localizan las tasas que se van a utilizar. Todo esto agrupado genera el diagrama de Forrester.

Después, se crea el modelo matemático, convirtiendo el diagrama de Forrester en una serie de ecuaciones. Se incluye la política de prioridad ya que principalmente se va a utilizar el agua del depósito, y si no es suficiente ya se pasa a utilizar el agua del lago.

Seguidamente, se utiliza Vensim para introducir dentro del diagrama de Forrester las ecuaciones o variables correspondientes del modelo matemático en cada uno de los niveles, flujos o tasas.

Por último, se realizan las simulaciones y se generan gráficos que muestran la evolución de los niveles y flujos, se comparan los escenarios, y tras comprobar los resultados, se proponen medidas para mejorar, así como aumentar almacenamiento o incluso disminuir la demanda, midiendo el efecto con nuevas simulaciones.

CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO

Enunciado

Los cultivos de regadío necesitan agua para poder mantenerse productivos. Esta agua proviene de dos fuentes distintas, por un lado, de agua de lluvia almacenada en un depósito, y por otro, de un lago cercano.

El agua de lluvia se recoge y se almacena en un depósito, cuyo volumen inicial es de 250 m³. La entrada de agua al depósito se modeliza mediante una tasa mensual variable, que representa la variabilidad de las precipitaciones, tomando valores aleatorios uniformes entre 300 y 780 m³/mes.

Cuando el depósito no es suficiente para cubrir el riego, se recurre a un lago que actúa como fuente alternativa. El lago tiene inicialmente 800 m³ de agua. El lago recibe agua con una tasa mensual variable entre 120 y 300 m³/mes y pierde agua de forma natural (evaporación/filtración/desagüe) con una tasa mensual variable entre 60 y 180 m³/mes.

El cultivo requiere una demanda mensual de riego también variable para reflejar cambios climáticos y necesidades del cultivo, tomando valores aleatorios uniformes entre 480 y 840 m³/mes.

La política de abastecimiento es la siguiente: el riego se cubrirá prioritariamente con el agua del depósito de lluvia. El lago solo se utilizará cuando el depósito no pueda cubrir completamente la demanda, aportando únicamente el agua restante necesaria.

Se pide representar el sistema mediante un diagrama de Forrester con dos niveles (Depósito de lluvia y Lago) y simular su evolución en Vensim con unidad de tiempo mensual durante 12 meses, analizando la evolución del volumen en ambos almacenamientos y el uso del lago como respaldo.

Diagrama de Forrester

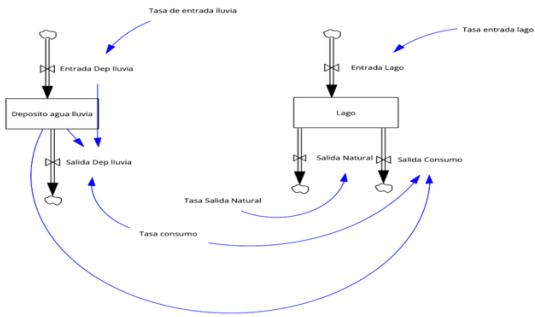


Ilustración 2: Diagrama de Forrester

Modelo Matemático

Depósito agua lluvia = Depósito_0 + Entrada Dep. lluvia – Salida Dep. lluvia

Depósito_0 = X

Entrada Dep. lluvia = Tasa de entrada lluvia

Salida Dep. lluvia = If (Depósito agua lluvia >= Tasa consumo)

Salida Dep. lluvia = Tasa consumo

Else (Depósito agua lluvia < Tasa consumo)

Salida Dep. lluvia = Depósito_0 + Entrada Dep. lluvia

Lago = Lago_0 + Entrada Lago – (Salida Natural + Salida Consumo)

Lago_0 = X

Entrada Lago = Tasa entrada lago

Salida Natural = Tasa Salida Natural

Salida Consumo = if (Depósito agua lluvia < Tasa consumo)

Salida Consumo = Tasa consumo – Depósito agua lluvia

Else

Salida Consumo = 0

Diagrama en Vensim

Zip adjunto.

Simulaciones

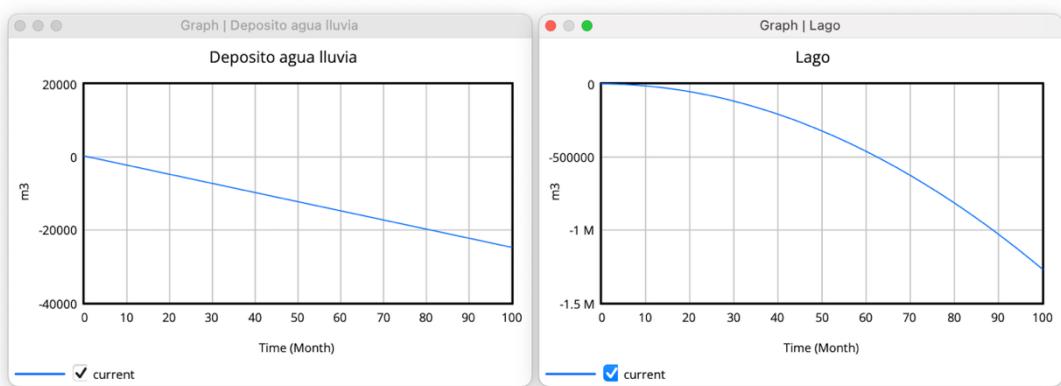


Ilustración 3: Gráficas sobre Depósito agua lluvia y Lago

Ilustración 3: La simulación refleja una disminución constante del volumen del depósito durante el periodo de tiempo llegando incluso a alcanzar cifras negativas. Esto no quiere decir que haya agua negativa en términos físicos, más bien que el reservorio se va agotando por lo que el modelo empieza a carecer de agua (necesidad de riego que ya no puede satisfacerse con la lluvia almacenada). El principal motivo es que en promedio el consumo es mayor que la entrada de lluvia por lo que el balance neto hace que sea constantemente negativo. Por lo que, en resumen, el depósito actúa como la fuente principal, pero no basta para mantener la demanda durante todo el periodo, y el resultado es que el sistema entra en periodo de estrés hídrico.

Ilustración 4: La gráfica del lago muestra un declive cada vez mas grande (curvatura descendente) hasta llegar a alcanzar valores altamente negativos. Esto sucede porque cuando el depósito de lluvia se termina, el sistema utiliza el agua del lago como fuente secundaria por lo que se trata de un recurso adicional para satisfacer la demanda. A la vez, el lago presenta también pérdidas naturales debido a fenómenos atmosféricos como la evaporación, la cual vuelve menos favorable al balance. La curvatura muestra que la extracción desde el lago no es constante, sino que gradualmente incrementa conforme el déficit crece. En resumen, el lago tiene la funcionalidad de amortiguador, pero si el depósito contiene un fallo en su estructura, el lago pasa a ser la fuente principal siendo incapaz de mantener el consumo, y se produce un déficit acumulado.

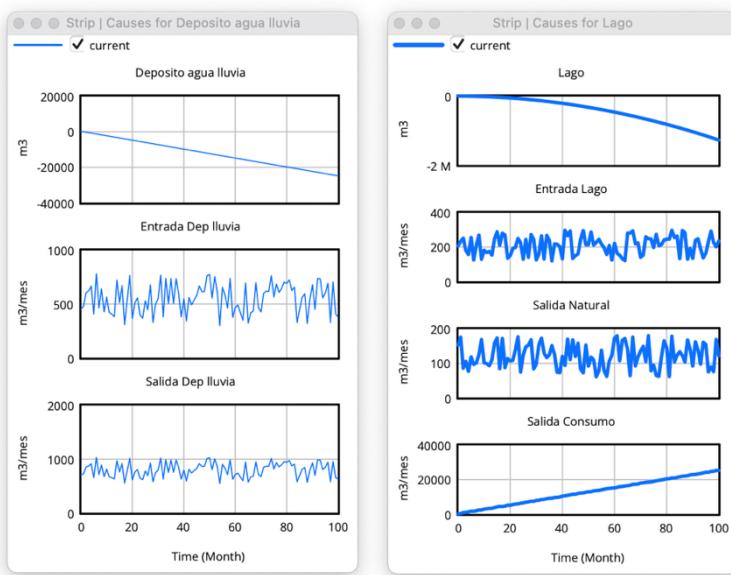


Ilustración 4: Flujos de entrada y salida de Depósito agua lluvia y Lago

Ilustración 5: Entrada Dep Iluvia: Se percibe un comportamiento inconstante, ya que la entrada depende de los episodios de la lluvia (meses más húmedos y secos).

Salida Dep Iluvia: también varía, aunque se sostiene en cifras comparativamente elevadas. Esto muestra que el depósito se está utilizando intensivamente para cubrir el riego.

Depósito agua lluvia (nivel): El resultado (salida>entrada), ocasiona una reducción constante en el nivel.

A resumidas cuentas, a pesar de que existen meses con más entrada, esta no compensa el consumo masivo acumulado por lo que el depósito termina colapsando.

Ilustración 6: Entrada Lago: se sostiene en un rango variable moderado por contribución externa.

Salida natural: Se presenta como una pérdida más o menos estable que drena el lago incluso sin que haya consumo.

Salida consumo: a lo largo del tiempo, la salida consumo aumenta. Eso explica porque desciende tan rápido el nivel del lago, porque el sistema exige al lago cubrir tanto la demanda como el vacío del depósito cuando se agota.

Por lo tanto, el lago hereda la carga en el momento en el que se vacía el depósito y dado que el modelo no limita la extracción, surge un incremento en el consumo y se acumula un déficit.

Decisiones

Hay un desbalance entre entradas disponibles y demanda de riego, según las simulaciones ejecutadas. Específicamente, el sistema comienza a depender del lago cuando la tasa de consumo excede la aportación efectiva del depósito de lluvia, y si el déficit sigue creciendo, se muestra una tendencia hacia el vacío de los almacenamientos (en el modelo, incluso con los valores negativos si no se establecen restricciones físicas). Se proponen diferentes tipos de soluciones para rectificar esta conducta, cada solución enfocada en variables específicas del sistema (tasa de entrada o salida, capacidad de almacenamiento y demanda).

Decisiones:

1- Incrementar la recolección de agua de las lluvias

Aumentar la recolección de lluvia el depósito es una acción directa para disminuir el déficit, como al ampliar la superficie de recogida o incluso al mejorar la filtración. En el modelo, esto significa el incremento de la tasa de entrada lluvia, lo que a su vez hace crecer la variable Entrada Dep lluvia. Se prevé que el efecto sea

que el depósito se recupere con mayor rapidez y pueda tener la capacidad de cubrir un porcentaje más grande de riego, disminuyendo la periodicidad con la que se activa el uso del lago.

2- Incrementar la capacidad o volumen inicial del depósito

Si el depósito es pequeño o si parte con un volumen bajo, el sistema comienza su déficit más pronto. Por lo tanto, decisión eficaz es el incremento del tamaño del depósito o definir un volumen inicial más realista. Desde el punto de vista del modelo, esto alarga el periodo en el que el depósito deja de satisfacer la demanda y reduce la necesidad de extracción del lago. Esta decisión no genera agua, pero la estabilidad del sistema se hace más grande al hacer más resistente a los períodos de escasa lluvia.

3- Reducir la demanda de riego mediante eficiencia

Cuando la tasa de consumo es excesivamente alta en relación con las entradas, surge el problema principal. La solución más sólida consiste en disminuir la demanda mediante acciones de eficiencia: goteo para regar, programación nocturna, sensores de humedad, elección de cultivos que requieran menos o modificación de área regada. En el modelo, se manifiesta como una disminución de la tasa de consumo, que automáticamente reduce tanto la Salida Dep. lluvia como la Salida Consumo. El sistema más sostenible es el resultado más esperado: el lago se utiliza como soporte real, no como recurso primordial, y la cisterna tarda más en vaciarse.

4- Protección del lago mediante un umbral mínimo de extracción y control de salidas naturales.

Aunque el lago es un recurso alternativo, puede ser deteriorado rápidamente si se utiliza sin control alguno. Para prevenir esa situación, es posible implementar una política de gestión que es no extraer por debajo del volumen mínimo del lago, llamado umbral ecológico, y además establecer ciertas acciones para la disminución de pérdidas naturales cuando sea factible, como por ejemplo el control de las filtraciones, mejora de las infraestructuras o incluso reducir

evaporación utilizando soluciones técnicas. En el modelo significa restringir la Salida Consumo cuando el lago disminuye de un mínimo o reducir la Tasa de Salida Natural. La meta es que el sistema no resuelva el déficit mediante la destrucción del lago, sino forzándolo a funcionar dentro de los límites sostenibles.

RESULTADOS Y EVALUACIÓN

La simulación revela que el depósito de agua de lluvia presenta una tendencia descendente sostenida, lo que significa que con los valores actuales la demanda de riego excede a las lluvias y concluye en un balance negativo. El modelo muestra un déficit hídrico cuando el depósito llega a niveles cercanos al cero. Esto debe ser interpretado como escasez de agua disponible, no como existencia de agua negativa.

El lago muestra también una reducción progresiva, que se intensifica cuando el reservorio no consigue satisfacer la demanda, y esto pasa porque cuando funciona como respaldo, el lago soporta tanto la salida natural como la del riego, lo que hace que su vaciado sea más rápido.

En general, el sistema no es sostenible, porque el depósito no puede sostener el riego y el lago se transforma de apoyo a fuente principal, lo que incrementa la probabilidad de que el recurso se agote. Esto hace razonable mejorar la eficiencia o limitar la demanda para estabilizar el sistema.

CONCLUSIONES

Se ha examinado un sistema de riego que obtiene agua de dos fuentes diferentes, una de ellas es un depósito de agua de lluvia utilizada como fuente principal, y luego como fuente secundaria se utiliza un lago cuando el depósito no es capaz de satisfacer la demanda, utilizando el modelo matemático implementado en Vensim y el diagrama de Forrester. La simulación facilita la visualización clara del funcionamiento del sistema y también el hecho de saber si la estrategia de abastecimiento es sostenible en función de los parámetros establecidos.

Los resultados obtenidos revelan un patrón de vaciado gradual del depósito de lluvia, lo que indica que en el escenario simulado, no se cubre el consumo de

riego con la entrada de agua de lluvia. Por lo tanto, el sistema se apoya más y más en el lago provocando un aumento de la salida de consumo desde él y su declive. Que existan valores negativos no es físicamente realista, indica que el modelo no tiene límites de no negatividad, por lo que las salidas siguen funcionando a pesar de que el volumen esté agotado.

En general, el escenario simulado muestra un desbalance entre la demanda y las contribuciones, siendo utilizado para justificar decisiones de mejora, sean aumentar almacenamiento o disminuir el consumo o incluso establecer restricciones para evitar consumos cuando no hay agua disponible.

BIBLIOGRAFÍA APA

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2012). *Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security*. FAO.

Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.

Imteaz, M. A., Bayatvarkeshi, M., & Karim, M. R. (2021). Developing generalised equation for the calculation of payback period for rainwater harvesting systems. *Sustainability*, 13(8), 4266. <https://doi.org/10.3390/su13084266>

Vensim. (2024). Vensim User's Guide. Obtenido de Vensim: https://www.vensim.com/documentation/user_guide.htm