

Eixo Temático: Inovação e Sustentabilidade

**SIMULAÇÃO DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL UTILIZANDO
MODELAGEM MATEMÁTICA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

**SIMULATION OF CENTRAL PIVOT IRRIGATION MANAGEMENT USING
EVAPOTRANSPIRATION MATHEMATICAL MODELING**

Taísa Belzarena Monteiro, João Fernando Zamberlan, Manuel Osorio Binelo, Vitor Belzarena Monteiro e William Lopes Lages

RESUMO

Para o produtor rural, a irrigação hoje é sinônimo de segurança e estabilidade. Para demandar a real necessidade hídrica da planta cultivada, uma das variáveis a ser medida é a evapotranspiração, onde utilizando dados como índice de evaporação e transpiração, temperatura do ar e precipitação, é possível estimar se há condição de estresse ou deficiência hídrica, ou boas condições para o desenvolvimento da cultura, a partir do equilíbrio hídrico do solo/planta/atmosfera. Este estudo foi projetado por meio de uma pesquisa quantitativa, trabalhando dados numéricos, e teve como objetivo criar um programa computacional por meio da Modelagem Matemática com simulações numéricas no *software Scilab*, para o manejo da irrigação com base na evapotranspiração, utilizando os dados de uma plantação real, e simulando o ambiente controlado de irrigação; validando o estudo de caso da comparação de ambos os ambientes. Com o uso de dados obtidos e de gráficos desenvolvidos, foi claramente demonstrada a relação entre o índice de precipitação e de evapotranspiração. Desta forma, este estudo traz ao agricultor bons subsídios para tomada de decisão sobre quando e quanto irrigar, trazendo uma nova forma de gerenciar com responsabilidade, sustentabilidade, economia hídrica e, conseqüentemente, melhores lucros para sua safra.

Palavras-chave: aspersão, soja, scilab, gestão.

ABSTRACT

For the rural producer, irrigation today is synonymous with safety and stability. In order to demand the actual water requirement of the cultivated plant, one of the variables to be measured is evapotranspiration, where using data such as evaporation and transpiration index, air temperature and precipitation, it is possible to estimate if there is a condition of water stress or deficiency, or good Conditions for the development of the crop, from the water balance of the soil / plant / atmosphere. This study was designed through a quantitative research, working numerical data, and had as objective to create a computational program through Mathematical Modeling with numerical simulations in the software Scilab, for the management of the irrigation based on the evapotranspiration, using the data of a Planting, and simulating the controlled irrigation environment; Validating the case study of the comparison of both environments. With the use of data obtained and graphs developed, the relationship between precipitation index and evapotranspiration index was clearly demonstrated. In this way, this study provides the farmer with good subsidies to make decisions about when and how much to irrigate, bringing a new way of managing with responsibility, sustainability, water economy and, consequently, better profits for its harvest.

Keywords: spraying, soy, scilab, management.

1 INTRODUÇÃO

O Planeta Terra é formado de 70% (setenta por cento) água, porém, apenas 03% (três por cento) é água doce, sendo que desta, 11% (onze por cento) está no Brasil, e 69% (sessenta e nove por cento) de todo recurso hídrico consumido no país é utilizado na prática de irrigação. (ANA, 2014).

A irrigação na agricultura vem crescendo nos últimos anos como uma escolha dos produtores para otimizar a produção mundial de alimentos, preocupados com o desenvolvimento sustentável no campo, com a geração de empregos e a obtenção de renda de forma estável (MANTOVANI et al., 2006). Todavia, conforme FLORES (p. 34, 2000), a irrigação, principalmente despreocupada com os subsídios costumeiros à agricultura, emprega em sua grande maioria processos arcaicos de inundação e alagamento, de tradição milenar em seus países com grandes perdas de água.

Segundo Yin *et al* (2017), o cálculo da evapotranspiração de referência torna-se de extrema importância quando a concepção de gestão agrícola da irrigação está aliada ao planejamento de conservação de água, fator indispensável hoje em dia no manejo de culturas, sejam elas quais forem ou em que lugar do mundo.

Sendo a soja uma das principais culturas do país, em muitas plantações de pequeno e médio porte do estado do Rio Grande do Sul, a irrigação é realizada por meio de pivôs não automatizados, os quais são ligados e desligados manualmente pelo agricultor, este que define a quantidade de água necessária para o bom crescimento daquela cultura e, conseqüentemente, o tempo que o pivô ficará ligado. Como consequência, pode-se ter irrigação em excesso em alguns pontos da plantação, causando desperdício desnecessário de água, que mesmo sendo esta de poços artesianos, córregos, rios ou lagos, tal atitude vai contra toda e qualquer tentativa de sustentabilidade e economia de água. O excesso de H₂O em taxas superiores a taxa de infiltração básica, provoca ou ocasiona erosão e deflúvio superficial.

Devido a crescente escassez hídrica em diversas regiões do mundo, a economia de água passou a ser uma questão de consciência coletiva, conforme FLORES (2000):

Preliminarmente, é preciso mudar os hábitos antigos esbanjadores de água tão costumeiros [...]. Nos futuros projetos, seja industriais rurais ou urbanos, cumpre levar e conta precipuamente a economia no uso da água. Paralelamente, deve-se amenizar as áreas em situação hídrica desfavorável, com transposições feitas criteriosamente e sem qualquer desperdício ou perda de água.

Tendo em vista o desenvolvimento sustentável a fim de controlar a crise hídrica principalmente no Brasil, este estudo fez uma comparação entre o método tradicional de decisão da quantidade de água utilizada em plantações de soja por meio de irrigação por aspersão utilizando pivô central, e um método de economia hídrica tomando como parâmetro a diferença entre as taxas de evapotranspiração e de precipitação, para definir a demanda de irrigação por aspersão, utilizando para isso a modelagem matemática desses processos.

Este trabalho teve como propósito realizar a modelagem matemática da evapotranspiração e por meio de simulações numéricas criando um modelo inteligente de irrigação que otimize a utilização de água e energia elétrica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja e sua demanda hídrica

No levantamento feito pela ABIMAQ (2002), fica clara a importância da irrigação na agricultura, independente da cultura plantada, principalmente no Brasil onde temos um clima tropical, com instabilidades no clima por parte das precipitações e temperatura. A produtividade é mais estável quando se tem uma cultura irrigada, consequentemente, tem-se uma segurança maior quanto à colheita, um aumento na geração de empregos e uma lucratividade mais garantida do que uma plantação sem os recursos de irrigação disponíveis hoje em dia para ajudar o agricultor.

A semente de soja necessita absorver água no volume correspondente a 50% de seu peso para iniciar o processo de germinação (THOMAS & COSTA, p.14, 2010). Segundo os referidos autores, de acordo com o desenvolvimento da cultura da soja, a necessidade de água aumenta, possuindo estágios mais sensíveis, como o de reprodução. Em média, a cultura da soja necessita de 6 mm diários durante todo o seu ciclo.

O stress hídrico pode ser causado pela falta ou excesso de água, gerando diversas consequências negativas para a cultura. Gomes (2011, *apud* Mundstock e Thomas, 2005) afirma que a deficiência hídrica em qualquer estágio de desenvolvimento da soja altera a quantidade de massa produzida, afetando o equilíbrio entre o crescimento vegetativo e o reprodutivo. Gomes (2011, *apud* Oplinger, 2004) também ressalta que as plantas de soja possuem tendências a se adaptar a variação das taxas de uso de água, afirmando que, quando iniciada a irrigação, qualquer interrupção brusca no abastecimento de água poderá ocasionar maiores perdas em produtividade das plantas irrigadas quando comparadas as plantas que não receberam nenhuma irrigação. Desta forma, evidencia-se a importância da gestão da irrigação, principalmente tratando-se de uma cultura sensível ao stress hídrico, como a cultura da soja.

A erosão causada pela irrigação é um dos problemas de sustentabilidade mais sérios na agricultura, impactando não só a viabilidade estratégica e comercial futura da prática de irrigação, como também a sobrevivência e o conforto da população humana da Terra. Assim, prevenir a erosão induzida pela irrigação para manter altos rendimentos das culturas e as vantagens de qualidade da agricultura irrigada torna-se uma das chaves da preservação dos ecossistemas naturais (ANĂSTĂSOAEI e LOGIGAN, 2015). Desta forma, o presente estudo tem grande importância no que tange a gestão da irrigação, visando um melhor controle da quantidade de água depositada no solo.

2.2 Umidade do Solo

Segundo Bernardo et al (2006), o solo pode ser considerado uma grande caixa d'água, sendo composto de partículas sólidas, líquidas e gasosas. O volume de sólidos pode ser considerado fixo, enquanto os gases e a solução dividem o espaço poroso do solo.

Conforme BERNARDO *et al* (p.17, 2006),

A umidade do solo influencia diretamente o volume de água nele armazenado, bem como a sua resistência e a compactação, entre outros fatores. Logo, é de capital importância o conhecimento da umidade do solo para estudos do movimento da água no solo, disponibilidade de água, erosão, época e quantidade de água a ser aplicada em irrigação e muitos outros problemas.

A partir dos recentes avanços tecnológicos, pode-se afirmar que o solo se tornou um significativo sensor de água disponível nele, que auxilia na operação eficiente e automática dos sistemas de irrigação. Assim, através desse sensor automático de água do solo a irrigação procura manter uma faixa de água no solo desejada na zona de raiz, situação ideal para o melhor crescimento da planta possível. Para determinar o estado de água do solo, deve-se

escolher entre a forma direta ou indireta, sendo aquela por amostragem de solo e pouco utilizada por ser mais trabalhosa e ter um tempo de resposta maior. Já a forma indireta, por detecção da umidade do solo, é a mais utilizada por possibilitar que sejam usadas sondas instaladas permanentemente no campo em pontos estratégicos, e que possam fornecer leituras repetidas da umidade do solo ao longo do tempo, as quais podem auxiliar na gestão da irrigação. (CARPENA e DUKES, 2005).

Devido sua importância, a umidade do solo foi componente principal na determinação da demanda hídrica da cultura da soja em questão, e os resultados dela alimentaram o modelo matemático desenvolvido neste estudo.

2.3 Método de Irrigação por Aspersão

Segundo Correia, Rocha e Rissino (2016),

Com a aplicação de pouca água (irrigação com déficit), a produção não poderia obter o benefício esperado. Por sua vez, a aplicação excessiva de água é muito mais prejudicial, pois satura o solo, o que impede a sua aeração, lixivia nutrientes, induz maiores evaporação e salinização e, posteriormente, pode elevar o lençol freático para um nível que pode ser drenado somente a um alto custo. Além disso, o excesso propicia microclima favorável ao desenvolvimento de doenças, que podem causar prejuízo à cultura.

Conforme relatório do Ministério de Integração Nacional (2013), a irrigação por aspersão com pivô central é a que mais cresce no Brasil, tendo no ano de 2000 aproximadamente 48 mil hectares irrigados e em 2012 em torno de 84 mil hectares irrigados, levando em consideração a área cultivada – de 10 mil a 90 mil hectares – e a evolução dos anos desde 2000 a 2012.

Na irrigação por aspersão, um ou mais jatos de água são lançados ao ar em forma de gotas, chegam ao solo em forma de chuva artificial. O fracionamento dos jatos é causado pela passagem da água sob pressão por orifícios de pequena dimensão, e contando com o auxílio de um sistema de bombeamento, a água ganha pressão para sair pelos aspersores após passar por um conjunto de tubulações (BISCARO, 2009). Para o presente estudo foi utilizado o método de irrigação por aspersão com pivô central.

Segundo Biscaro (2009), a irrigação por aspersão é uma das que mais cresce no Brasil, pois possui diversas vantagens, entre elas, o fato de não ter restrição de horários de uso, a disponibilidade de maior área cultivável e a não exigência de um processo de sistematização do terreno. Esse tipo de irrigação pode ser muito vantajosa quando utilizado em solos argilosos, uma vez que em solos arenosos e franco-arenosos a infiltração é de maior facilidade e por isso podem ser utilizados outros tipos de irrigação mais baratos. Apesar de tantas vantagens, este método de irrigação também possui pontos fracos, como o alto custo de capital inicial, a interferência do vento na aspersão das gotas de água, as perdas de água por evaporação direto do jato fracionado e a necessidade de implantação de um sistema moto bomba de alta potência, dependendo da área a ser irrigada.

2.4 Modelagem Matemática

Segundo Shannon (1977), “um modelo computacional é um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa”. Assim, entende-se como Modelagem Matemática, a utilização de cálculos matemáticos utilizados para simular ambientes reais e seus resultados, porém, realizando apenas simulações computacionais.

Para Meerschaert (2013), a modelagem matemática é o elo entre a matemática e o resto do mundo, onde se pode fazer uma pergunta, formulá-la melhor transformando-a em termos matemáticos precisos, e obter uma resposta exata do que se espera saber, porém, com a necessidade de uma tradução de volta para a linguagem em que a pergunta original foi feita.

Neste trabalho foram utilizados como referência os experimentos feitos por Gonçalves e Borges (2009), no estudo intitulado “Modelagem Matemática da Evaporação através de dados experimentais do teor de água no solo”, onde foram realizados cálculos matemáticos para definir a evaporação na fase potencial, utilizando apenas dados da variação do teor de água no solo.

Para a extração dos dados iniciais, Gonçalves e Borges (2009) utilizou quatro amostras de solo com diferentes proporções de argila e areia, e as colocou em cilindros metálicos de raio = 0,20cm e altura = 0,3cm, e no lugar do fundo foi colocada uma malha de tecido. A cada 2cm de profundidade a partir da borda, foi medido o teor de água no solo com a ajuda de oito transdutores térmicos, durante três dias ininterruptos. Para que a interferência de um transdutor no outro fosse mínima, eles foram colocados em forma de espiral.

Os dados deste experimento foram utilizados no cálculo da evaporação total e instantânea, aplicando-os em modelos matemáticos e levando em consideração duas hipóteses: Primeira, o fluxo da evaporação é constante, sendo que este é encontrado resolvendo o problema inverso, onde são diminuídas as diferenças entre o teor de água experimental e simulado, em vários pontos da coluna de solo. Na segunda hipótese o teor de água da camada superficial é ajustado de acordo com os dados obtidos no experimento e utilizado como condição de fronteira do problema direto. Sendo a Equação de Richards não linear, a solução foi implementada numericamente pelo Método das Diferenças Finitas, utilizando o esquema explícito de avanços temporais, desenvolvido com programa próprio. Assim, com a extração dos dados das condições experimentais, foi desenvolvido um modelo matemático que leva ao cálculo da evaporação em forma de equação diferencial parcial, utilizando condições de fronteira com possibilidades de primeira e segunda espécie (Gonçalves e Borges, p.03, 2009).

Quando o solo em questão possui massa específica e textura homogêneas em todos os pontos levados em consideração, geralmente se utiliza a Equação de Richards para descrever a dinâmica da água no solo. A referida Equação também pode ser utilizada em sua forma unidimensional, quando se tem um problema que assume que as derivadas do potencial matricial não variam de acordo de forma significativa nas direções X e Z, conforme a Fórmula 1:

Fórmula 1: Equação de Richards de forma unidimensional, onde $0 < z < H$ e $t > 0$.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\Theta) \frac{\partial \Psi_m}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\Theta)}{\partial z}$$

- Θ é o teor de água dimensional;
- Ψ_m é o potencial matricial (cm H₂O);
- K é a condutividade hidráulica (cm/s);
- z é a altura de solo (cm);
- H é a altura da coluna de solo (cm);
- t é o tempo (dias).

Na Equação de Richards, foram utilizados como variáveis o potencial matricial e o teor de água no solo. Porém, para resolvê-la é necessário saber da relação entre elas, como parâmetros específicos do solo estudado, já que nosso objetivo é ter apenas uma variável temporal, uma espacial e uma de estado. A fim de encontrar o potencial matricial (ψ_m) utilizado na Equação de Richards, utiliza-se a Equação de Van Genuchten (1980), a qual utiliza o teor de água adimensional (Θ) e os parâmetros a , m e n , dados obtidos com experimentos feitos para cada tipo de solo, conforme Fórmula 2:

Fórmula 2: Equação de Van Genuchten (1980)

$$\psi_m = \frac{1}{a} \sqrt[n]{\Theta^{-1/m} - 1}$$

Após descrever a dinâmica da água no solo, é necessário calcular a evaporação, a qual, segundo Reichardt (1968), quando na primeira fase é constante, ou seja, há água disponível para ser evaporada nas primeiras camadas de solo, independente das condições climáticas atmosféricas. Assim, fica entendido que as primeiras camadas do solo são abastecidas hidricamente pelas camadas mais profundas (Gonçalves e Borges, 2009).

No estudo de Gonçalves e Borges (2009), foram utilizadas duas hipóteses para se calcular a evaporação:

Hipótese 1: O fluxo de água evaporada é constante em relação ao tempo adotado, onde, na forma de Equação, define-se o fluxo de água evaporada (E) medida em cm/dia através da divisão do volume de água evaporada (V_E) medido em cm^3 , pelo produto da área do solo (A) medida em cm^2 e pelo intervalo de tempo levado em consideração (Δt) e medido em $dias$, conforme Fórmula 3:

Fórmula 3: Equação da água evaporada constante a em relação ao intervalo de tempo estudado.

$$E = \frac{V_E}{A \Delta t}$$

Hipótese 2: Tendo como base apenas os dados experimentais da camada superficial do solo, Gonçalves e Borges (2009) definiu o teor da água da primeira célula é ajustado conforme os dados experimentais. Para esta hipótese, deve-se considerar duas alternativas:

Ajuste linear: analisando a distribuição dos dados do teor da água na primeira camada do solo, observou-se que em uma grande parcela do tempo monitorado, estes dados apresentaram tendência linear.

Ajuste exponencial: considerando a distribuição dos dados experimentais da cama superficial do solo, observou-se que no final do primeiro intervalo onde os dados apresentaram tendência linear, a taxa de variação do teor de água vai se aproximando de zero, o que pode caracterizar o início da segunda fase da evaporação.

Seguindo o estudo de Gonçalves e Borges (2009), após calcular a evaporação e o teor de água no solo, este trabalho pôde utilizar os resultados para definir a umidade do solo, variável essencial para a determinação da demanda hídrica de uma plantação de soja.

Para a construção de um Modelo Matemático que represente da melhor forma possível uma situação real, um dos softwares que estão a disposição de forma gratuita aos usuários é o *Scilab*, que segundo Teschler (2011), inclui cerca de 1700 funções matemáticas através de uma linguagem de alto nível, que auxilia na construção de estruturas de dados avançadas e funções gráficas 2D e 3D, além dos usuários terem disponíveis o pacote para

resolver problemas em estatísticas, design e análise do sistema de controle, processamento de sinal e otimização.

3 METODOLOGIA

O trabalho proposto foi desenvolvido por meio de Pesquisas Quantitativas, onde, segundo WAINER (2010), foram trabalhados dados numéricos, os quais são considerados mais ricos que descrições verbais, pois se adequam à manipulação estatística, além das variáveis observadas serem consideradas objetivas, ou seja, diferentes observadores obterão os mesmos resultados em observações distintas.

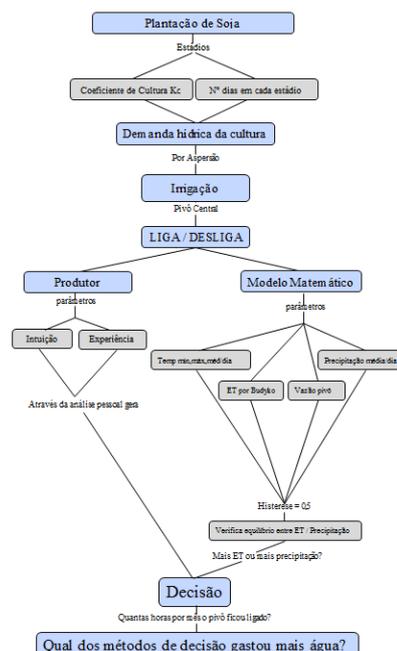
Para sua execução de forma organizada e pela sequência necessária de conhecimentos a serem observados, o presente estudo foi dividido em três etapas, sendo elas de Projeto, Desenvolvimento e Comparação.

3.1 Projeto

Para a execução do presente estudo, foram necessários alguns conhecimentos prévios e pesquisas a serem feitas, as quais trouxeram subsídios para o desenvolvimento do modelo matemático, conforme seguem listados abaixo e mostrado na Figura 1.

- Investigação sobre a demanda hídrica da cultura da soja;
- Pesquisa sobre o método de irrigação por aspersão utilizando pivô central;
- Investigação das variáveis que definem o grau de evapotranspiração;
- Estudo teórico referente à modelagem matemática utilizando o *software Scilab*.

Figura 1: Organograma orientado do presente estudo



Fonte: desenvolvido pelo autor

Conforme ilustra a Figura 1, este estudo foi orientado a partir da pesquisa sobre as Plantações de Soja, onde foram encontradas informações sobre os estádios em que o grão passa desde o plantio até a colheita. Pôde-se conhecer sobre o Coeficiente da Cultura (K_c) e quantos dias dura em média cada estágio da Soja, dados que contribuíram para a obtenção dos índices de demanda hídrica da cultura. Utilizando a Irrigação por aspersão com Pivô Central, foram analisadas duas formas de decisão quanto ligar ou não o pivô para irrigar: o método do produtor rural e o método utilizando o Modelo Matemático desenvolvido neste estudo.

Após realizadas pesquisas, ficou claro que o produtor rural utiliza, como parâmetros de decisão, sua intuição e experiência de campo, onde o mesmo verifica o estado do solo e da cultura, chegando a conclusão se naquele momento é necessário irrigar ou não. Já o Modelo Matemático criado por este estudo, utilizou dados reais como parâmetros de decisão, como a Temperatura mínima, máxima e média do dia, a vazão do pivô central utilizado em uma propriedade rural, a precipitação média do dia e o índice de Evapotranspiração calculado através da Equação de Budyko. Após a alimentação do Modelo Matemático com esses dados meteorológicos e técnicos, o modelo verifica se o solo está com umidade abaixo da condição de campo, sendo necessário ligar o pivô de irrigação até que a condição de equilíbrio hídrico da planta seja satisfeita.

Após o levantamento dos dados e resultados de ambos os métodos de decisão, foi comparado por meio de gráficos a quantidade de água utilizada em um mês, para que se verifique em qual das situações de gestão se obteve maior economia hídrica dentro de um mesmo período de tempo.

3.2 Desenvolvimento

Algumas etapas foram seguidas durante o desenvolvimento deste estudo, com o intuito de auxiliar na organização do trabalho e na inserção correta das informações necessárias para a criação do modelo matemático:

- Modelagem Matemática no *Scilab*, utilizando os dados de precipitação e temperatura obtidos na Estação Meteorológica da UNICRUZ, e dados técnicos do pivô central de um produtor, o qual foi escolhido conforme a disponibilidade de proprietários da região da cidade de Cruz Alta, bem como outras variáveis padrão do solo/planta estudado;
- Demonstrar através de gráficos o ambiente real de plantação de soja, onde são utilizados pivôs centrais ligados e desligados manualmente;
- Simulação de um ambiente controlado de plantação de soja, onde serão utilizados pivôs centrais ligados e desligados conforme demanda hídrica, definidas pela variação do índice de evapotranspiração.

3.2.1 Pesquisa dos históricos das variáveis

Para obter uma simulação o mais realista possível, foram utilizados dados dos históricos de Temperatura e Precipitação da Estação Meteorológica da Universidade de Cruz Alta, da própria cidade de Cruz Alta nos meses de Janeiro a Maio de 2015, onde os números de temperatura mínima e máxima do dia foram inseridos no Modelo Matemático para calcular, através da Equação de Budyko (Fórmula 4), a Evapotranspiração diária, e os números de precipitação diária foram utilizados para indicar a entrada de água no solo da plantação de Soja.

Fórmula 4: Equação de Budyko

$$ETo = 0,2T(mm d^{-1})$$

Sendo:

T = temperatura média do dia, em °C

Para que o Modelo Matemático calcule a demanda hídrica em cada fase do desenvolvimento da Soja, foi pesquisado sobre os estádios fenológicos da cultura, qual a duração de cada um deles em dias, bem como o Coeficiente de Cultura (Kc), sendo que, mesmo que cada cultura, dependendo da região e condições climáticas possua um Kc diferente, foi utilizado o Kc padrão da Soja.

3.3 Comparação

Estudo de caso da simulação de ambientes de irrigação controlado e dos gráficos de irrigação controlada manualmente, a fim de demonstrar que aquele demonstra uma economia hídrica maior.

Para comparação dos resultados deste estudo, foram utilizados dados do plantio e irrigação do mês de janeiro de 2015, fornecidos por um produtor de Soja da cidade de Cruz Alta, o qual possui em sua propriedade de 600ha, irrigação por pivô central com cobertura de 100ha, com vazão de 280m³/h (Tabela 1).

Tabela 1: Dados irrigação produtor

<i>Dia do mês*</i>	<i>Tempo irrigação (h)</i>	<i>Água gasta (m³)</i>	<i>Energia gasta (KW)</i>
14/01/2015	4	1120	480
18/01/2015	3	840	360
20/01/2015	3	840	360
22/01/2015	2	560	240
26/01/2015	5	1400	600
TOTAL MÊS	17	4840	2040

*Os dias do mês nos quais não houve irrigação por pivô central, não aparecem na tabela.

Fonte: dados obtidos pelo autor

Conforme Tabela 1, o produtor ligou o pivô central para irrigação 5 (cinco) vezes no mês de janeiro, sendo que este permaneceu ligado durante 17 (dezessete) horas totais no mês. A quantidade de água gasta no mês de janeiro com irrigação foi de 4.840m³, representando 2.040Kw gastos com o pivô central.

4 SIMULAÇÃO DO AMBIENTE

A implementação foi feita no *Software Scilab*, o qual possui linguagem própria, onde inicialmente foram declaradas as variáveis com valores fixos, extraídos dos históricos de Temperatura e Precipitação de Cruz Alta, do referencial teórico sobre Coeficiente de Cultura e dias de cada estágio da Soja, bem como a vazão do pivô central utilizado na propriedade rural estudada.

Para que o Modelo Matemático calcule quando é necessário irrigar/não irrigar, foi utilizado um valor de equilíbrio (0), sendo que os cálculos de Evapotranspiração e dados de Precipitação mostram quando o valor real do cálculo está acima ou abaixo do equilíbrio. Porém, para que esta mudança de estado, caso ocorra, não seja brusca e haja uma margem de segurança, foi acrescentado um valor para histerese de irrigação (0,5), assim, ao algoritmo verificar que o valor está abaixo do valor de equilíbrio, ele terá 0,5 de margem até que o programa diga que é necessário irrigar, e o mesmo serve para a função “desligar”.

O algoritmo foi feito para calcular a irrigação da Soja, em duas situações: todos os dias do mês de janeiro e todos os dias do mês de fevereiro, de hora em hora em ambos os meses, sendo que em todas as opções foram utilizados dados da Estação Meteorológica da Universidade de Cruz Alta, os quais foram inseridos como dados fixos nos vetores iniciais (“TempAmbienteDiaMin”, “TempAmbienteDiaMax”, “TempAmbienteDiaMed”, “ChuvaDia”).

Para os cálculos da simulação de irrigação foi utilizado o valor de vazão do pivô central de 0,28m³/h, sendo este proveniente da conversão dos valores de área e vazão disponibilizados pelo produtor, onde o pivô central irriga uma área total de 100 hectares com vazão de 280m³/h, logo, convertendo a área de hectare para m² temos 1.000.000m². Para definir quantos metros de vazão de água o pivô utiliza por hora, divide-se os 280m³ pelos 1.000.000m², e tem-se 0,00028m, o que transformado para milímetros resulta em 0,28mm.

Para fins de cálculos de evapotranspiração, o ciclo da soja foi dividido em quatro estádios (I, II, III e IV), conforme Bernardo et al (2006) apud FAO (1979), onde cada um dos estádios possuem um número médio de dias de duração (22, 30, 55, 25), bem como um coeficiente de cultura diferente para cada estádio do ciclo (0,4; 0,8; 0,8; 0,2).

Para a realização dos testes do sistema criado neste estudo, foram utilizados testes de caixa branca, onde apenas o programador teve acesso ao código do modelo matemático, além de poder editar variáveis e gerar os gráficos utilizados como resultados desta pesquisa.

Inicialmente, este estudo foi idealizado e o algoritmo foi construído para gerar uma simulação de 5 dias, gerando gráficos com o comportamento da irrigação real e controlada, para que fosse feita a comparação posterior. Porém, ao finalizar os primeiros testes de simulação da irrigação, notou-se que, para se obter uma visão mais ampla da irrigação mensal e gastos de energia, e pela grande quantidade de dados de temperatura e precipitação obtidas na Estação Meteorológica da UNICRUZ, seria possível realizar testes com um maior número de dados, inserindo mais dias no algoritmo. Assim, foram realizados testes contendo dados e ajustando o modelo matemático para o mês de janeiro e para o mês de fevereiro, os quais geraram dados satisfatórios no que diz respeito ao problema proposto neste estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao construir o modelo matemático, foram simulados dois ambientes (meses de janeiro e Fevereiro), utilizando dados reais de precipitação e temperatura, onde foram analisadas as simulações de: precipitação por hora (SimChuvaHora), evapotranspiração por hora (SimETHora), pivô central com irrigação ligada por hora (SimIrrigLigada), água acumulada no solo com a diferença da precipitação e da Evapotranspiração (SimSoloComIrrig), e água acumulada no solo com a irrigação (SomaSoloIrrig).

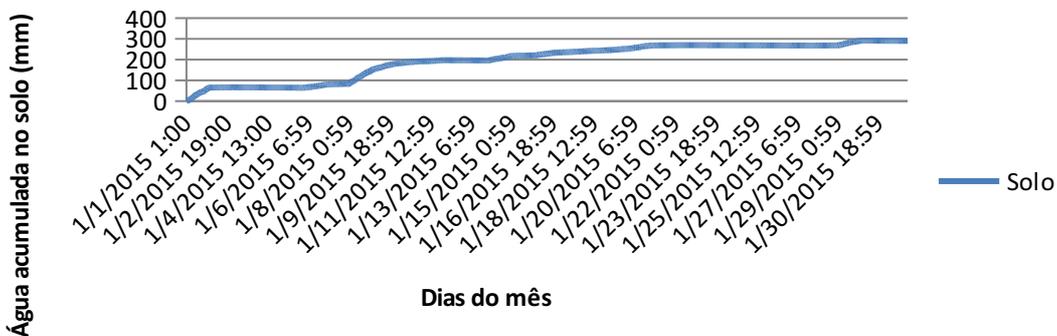
Figura 2: Dados de Precipitação do mês de janeiro de 2015



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Através dos cálculos do modelo matemático da simulação, pode-se perceber que no mês de janeiro a precipitação total acumulada foi de aproximadamente 314mm/mês (Figura 2).

Figura 3: Água acumulada no solo resultante da diferença entre a precipitação e a ET



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Através da Figura 3, pode-se perceber que, apesar das temperaturas entre 14.7°C e 32.6°C, a água acumulada no solo resultante da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração esteve alta praticamente o mês inteiro.

O fator de alta precipitação no início do mês de janeiro, bem como o acúmulo de água no solo ao final do mesmo mês, conforme a simulação, influenciaram para que a irrigação não fosse necessária em nenhum dia do primeiro mês do ciclo da Soja.

Entretanto, conforme dados enviados pelo agricultor, ao utilizar como parâmetros de decisão sua experiência e intuição, o pivô central foi ligado cinco vezes durante o mês de janeiro, sendo gasto um total de 4840mm de água (Figura 4).

Figura 4: Gestão de Irrigação do Produtor em janeiro de 2015



Fonte: Desenvolvido pelo autor, através de dados do produtor

Após a análise dos dados de irrigação do produtor, no mesmo período de janeiro de 2015, pode-se dizer que, sem o auxílio de cálculos mais precisos com variáveis que influenciam diretamente na plantação, o agricultor ligou o pivô central para irrigação desnecessariamente, causando o desperdício hídrico e energético.

Realizados também testes com os dados de precipitação e evapotranspiração do mês de fevereiro, pode-se dizer que a precipitação deste mês foi ao total 169.8mm, estando mais presente após o 10º dia (Figura 5).

Figura 5: Simulação da Precipitação no mês de fevereiro de 2015



Fonte: Desenvolvido pelo autor, através de dados da Estação Meteorológica da Universidade de Cruz Alta

Conforme análise da simulação da precipitação do mês de fevereiro, ficou caracterizada a necessidade de acionamento do pivô central em três dias do mês (dias 01, 03 e 09), com duração de cinco horas por dia, somando quinze horas em fevereiro (Figura 6).

Figura 6: Acionamento do pivô central de acordo com a simulação



Fonte: Desenvolvido pelo autor

Após todos os testes, pode-se dizer que o modelo matemático serve como um bom auxílio à decisão do produtor sobre o acionamento do pivô central de irrigação por aspersão, principalmente por tratar-se de um modelo com variáveis ajustáveis, de fácil interpretação e com resultados claros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o desenvolvimento sustentável a fim de controlar a crise hídrica principalmente no Brasil, este estudo realizou uma comparação entre o método tradicional de decisão da quantidade de água utilizada em plantações de soja por meio de irrigação por aspersão utilizando pivô central, e um método de irrigação por simulação utilizando um

modelo matemático, tomando como parâmetro a evapotranspiração para definir a demanda de irrigação da cultura da Soja na propriedade estudada.

Após a conclusão deste estudo, conforme mostraram os dados obtidos com as simulações e comparadas com os dados do produtor rural, pode-se dizer que o modelo matemático criado, mesmo que não possua exatamente todas as variáveis que possam interferir de alguma forma na irrigação, dá ao agricultor bons subsídios para tomada de decisão sobre quando e quanto irrigar na plantação de Soja. Os gráficos apresentados, juntamente com os números gerados pela simulação definem claramente a relação que o índice de precipitação tem com a evapotranspiração, bem como o quanto a temperatura influi neste último e, conseqüentemente, na quantidade de água utilizada na irrigação.

A criação deste modelo matemático traz uma nova ferramenta ao pequeno produtor rural, onde este pode definir antecipadamente como deverá ser a gestão do ciclo da Soja, desde o plantio até a colheita, respeitando as particularidades de cada estágio da cultura e o clima externo.

Desta forma, a modelagem matemática da evapotranspiração apresentada neste estudo, mostra ao agricultor uma nova forma de gerenciar sua produção rural com responsabilidade, sustentabilidade, economia hídrica e energética, e conseqüentemente, economia financeira e melhores lucros na safra da cultura da Soja.

7 RECOMENDAÇÕES DE ESTUDO

Após a realização deste estudo, o autor sugere este como referência para trabalhos futuros, onde seja criado um software para a gestão de um sistema de irrigação de aspersão por pivô central, que utilize outros métodos disponíveis para o cálculo da Evapotranspiração, onde inclua índices de Capacidade de Campo, Ponto de Murcha Permanente, Umidade do Solo e defluxo superficial, os quais possam de alguma forma interferir na irrigação, da mesma forma que as variáveis utilizadas neste estudo (temperatura, precipitação, coeficiente de cultura, estádios, etc.).

Com a contribuição deste trabalho, também pode-se utilizar o modelo matemático para analisar o manejo de irrigação de plantações em períodos de estiagem e que não estejam sob influência do fenômeno *El Niño*, podendo acentuar ainda mais a diferença dos tipos de gestão de irrigação.

Desta forma, fica evidente a importância de um software que auxilie o pequeno produtor na gestão da lavoura, principalmente tratando-se do grão de soja, visto a complexidade da cultura e a importância de uma colheita bem-sucedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional das Águas – ANA. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12696>.

ANASTASOAEI, Mihail, LOGIGAN, Ilie. ASPECTS OF SPRINKLING IRRIGATION ON SLOPES. *Lucrări Științifice*, Volume 58 (2), Serie Agronomie. Universitatea de Științe Agricole și Medicină Veterinară Iași. Iasi, 2015. Disponível em <<http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=5362c6c7-85e1-464a-8eb8-301c72fc5f4d%40sessionmgr102>>.

Associação Brasileira De Indústrias De Máquinas E Equipamentos – ABIMAQ. IMPORTÂNCIA DA IRRIGAÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DO AGRONEGÓCIO. Roberto Testazlaf, Edson E. Matsura e João Luiz Cardoso. 2002. Disponível em: <https://portais.ufg.br/up/68/o/Panorama_da_Irriga__o_no_Brasil_e_no_mundo.pdf>.

BERNARDO, Salassier, SOARES, Antonio Alves, MANTOVANI, Everardo Chartuni. MANUAL DE IRRIGAÇÃO. 8ª edição. Viçosa: UFV, 2006.

BISCARO, Guilherme Augusto. SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO. Editora UFGD. Dourados – MG, 2009.

CARPENA, Rafael Muñoz-. DUKES, Michael D. AUTOMATIC IRRIGATION BASED ON SOIL MOISTURE FOR VEGETABLE CROP. University of Florida. Florida, 2005, republicado em 2016.

CORREIA, Gustavo Rissari, ROCHA, Helder Roberto de Oliveira, Rissino, Silvia das Dores. AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COM MONITORAMENTO VIA APLICATIVO WEB. Revista REVENG – Engenharia da Agricultura. Volume 24, Nº 04. Viçosa – MG, 2016.

Estação Meteorológica da Universidade de Cruz Alta - UNICRUZ. Disponível em: <<http://www.nic.unicruz.edu.br/meteorologico/>>.

FLORES, Jorge Oscar de Mello. A CRESCENTE ESCASSEZ DE ÁGUA NO MUNDO. Revista ENSAIO – Conjuntura Econômica, 2000.

GOMES, Ana Carla dos Santos. ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO DA CULTURA DA SOJA EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2011. Disponível em: <http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=5754>.

GONÇALVES, Márcia Fritsch, BORGES, Pedro Augusto Pereira. MODELAGEM MATEMÁTICA DA EVAPORAÇÃO ATRAVÉS DE DADOS EXPERIMENTAIS DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO. X Encontro Gaúcho de Educação Matemática. Ijuí, 2009. Disponível em: <http://www.projetos.unijui.edu.br/matematica/cd_egem/fscommand/CC/CC_23.pdf>.

MANTOVANI, Everardo Chartuni, BERNARDO, Salassier, PALARETTI, Luiz Fabiano. IRRIGAÇÃO – PRINCÍPIOS E MÉTODOS. Viçosa: Ed. UFV, 2006.

Ministério da Integração Nacional – Secretaria Nacional de Irrigação. II SEMINÁRIO NACIONAL DE AGRICULTURA IRRIGADA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – RELATÓRIO FINAL. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=92671b3f-3ada-46ba-ba37-ee5e72e43120&groupId=10157>.

SHANNON, Robert E. SIMULATION MODELING AND METHODOLOGY. Editora ACM SIGSIM Simulation Digest. Nova York, 1977. Disponível em <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1102770>>.

MEESCHAERT, Mark M. MATHEMATICAL MODELING. Editora Elsevier, 4ª edição. USA, 2013. Disponível em <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=cI03SqP4vVgC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Mathematical+modeling&ots=DPoteimL1l&sig=pnzGB2M9JGu2kFYdv6c-k_ZGIE8#v=onepage&q=Mathematical%20modeling&f=false>.

TESCHLER, Leland. ATTACK OF THE MATH CLONES. Machine Design, Vol. 83 Issue 20, p44-48. 5p. USA, 2011. Disponível em <<http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=3&sid=70d31528-8ba8-429d-b507-c6ae99141a21%40sessionmgr120&bdata=Jmxhbmc9cHQYnImc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=79552436&db=aph>>.

THOMAS, André Luís, COSTA, José Antonio. SOJA – MANEJO PARA ALTA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS. Editora Evangraf. Porto Alegre, 2010.

WAINER, Jacques. MÉTODOS DE PESQUISA QUANTITATIVA E QUALITATIVA PARA A CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO. UNICAMP, 2010. Disponível em: <http://www.unisinos.br/blogs/informatica/files/2010/09/Pesquisa_Computacao1.pdf>.

YIN, Chunyan, LIU, Hu, ZHANG, Ruiqiang, WANG, Jian, WEI, Yongfu. COMPARISON OF CALCULATION METHODS FOR POTENTIAL REFERENCE CROP EVAPOTRANSPIRATION ET₀ IN NORTH XINJIANG. Agricultural Science & Technology. China, 2017.