

USOS DE RECURSOS NA DOSE CERTA: UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO AGRÍCOLA

Jose Airton Chaves Cavalcante^a

^aUFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Matemática (DTL), Seropédica, RJ, Brasil

Angel Ramon Sanchez Delgado^b

^bUFRRJ- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Demat, Seropédica, RJ, Brasil

Jose Antônio Carlos Canedo Medeiro^c

^cUFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEN/LMP, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Daniel Carvalho^d

^dUFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, IT, Seropédica, RJ, Brasil

Resumo

O presente artigo foi apresentado oralmente no VII CNEG, sendo revisado e expandido. Ele descreve um projeto que está sendo desenvolvido como tese de doutoramento no programa de pós-graduação binacional em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária – PPGCTIA / UFRRJ, cujo objetivo é a construção de um código computacional utilizando a filosofia “user friendly” (amiga do usuário) para otimizar a gestão do agronegócio minimizando custos e aumentando a produção e ampliando as possibilidades de acesso mais fácil mesmo a usuários com pouca experiência na utilização do computador.

O sistema permitirá escolher, dentre as alternativas de produção disponíveis, a mais eficiente na utilização dos recursos produtivos que satisfaçam certos objetivos preestabelecidos referentes ao solo, à umidade e ao meio ambiente em geral.

Hoje em dia já se dispõe de muita informação técnico-agrícola, mas persiste um grande problema a ser enfrentado: como consolidar estas informações de forma clara e simples e transmiti-las, visando sua utilização, com a menor intermediação possível para o produtor?

A necessidade de se reduzir a complexidade da gestão do agronegócio foi o motor da investigação sobre técnicas de otimização agrícola.

Palavras-chave: Agromatemática, Tecnologias de informação e comunicação, Recursos Hídricos, otimização agrícola. de Serviços.

1. INTRODUZINDO O PROBLEMA: A ÁGUA, UM RECURSO LIMITADO

Uma das primeiras revoluções culturais da humanidade foi promovida pela agricultura. Ela permitiu que o homem passasse do nomadismo para o sedentarismo e foi fundamental para a construção da civilização. Essa revolução se deu ainda na pré-história, no período Neolítico (cerca de 10.000 – 6.000 A.C.), mais conhecido como a idade da pedra polida. Devido a vários fatores, tais como as mudanças climáticas, surgiram condições que facilitaram aos nossos ancestrais se fixarem na terra.

A agricultura foi uma das mais importantes descobertas da História da Humanidade, uma vez que provocou profundas alterações na sociedade humana e na sua relação com o meio ambiente: o Homem fixou-se definitivamente num local e adaptou-o às suas necessidades. A esta lenta transformação, que demorou centenas de anos e tem por base uma economia produtora, dá-se o nome de revolução neolítica (GUIA, 2005).

A agricultura também foi responsável pelas primeiras inovações tecnológicas da humanidade. O domínio e transformação da natureza através de técnicas de cultivo e da domesticação de animais foram importantes no processo evolutivo do homem pré-histórico.

As primeiras culturas agrícolas foram o trigo, cevada, arroz, soja, milho e aveia; e desde os primórdios sempre houve a associação da agricultura com a pecuária. Nossos antepassados iniciaram a domesticação de animais, tais como o cachorro, para guarda e companhia de ovelhas, cabras e bois como alimento e fornecedores de pele e chifres.

Estão dentre as primeiras inovações tecnológicas que podemos destacar: a invenção do arado, da roda, da técnica do fogo, das primeiras armas e ferramentas, das vestimentas e abrigos, da cestaria, da cerâmica, da tecelagem. Tais técnicas e invenções humanas puderam se desenvolver devido ao sedentarismo e a agricultura que, substituindo o nomadismo e o extrativismo, favoreceu a produção de uma cultura cada vez mais rica e complexa.

A fixação num local facilitou por sua vez o surgimento da agricultura já que permitiu ao Homem a observação prolongada dos ciclos de vida das plantas e a experimentação do seu cultivo. Por outro lado, a agricultura, ao resolver melhor as necessidades alimentares e de conforto do Homem, criou ligações e obrigações deste para com a terra – ele tem de cultivá-la, apanhar e tratar o cereal – que o transforma definitivamente em sedentário. (GUIA, 2005)

A agricultura e a pecuária, além de assegurarem o fornecimento de alimento, inseriram o homem no mundo da multi-cultura. A agricultura foi responsável pelo surgimento das primeiras comunidades, pois o homem primitivo plantava perto dos rios e lagos, tendo também uma variedade de outros animais que podia fazer parte do seu cardápio alimentar e que também precisavam de água. As comunidades viraram aldeias e depois cidades. Assim, a associação agricultura/sedentarismo favoreceu também o aprimoramento da linguagem oral, dada a necessidade de ampliação da comunicação para grupos cada vez maiores.

O crescimento da população e a consequente ampliação da demanda de alimentos provocaram o desenvolvimento das primitivas técnicas de cultivo e irrigação, logo mais inovação, a que se seguem os primeiros conglomerados humanos, o comércio, gerando ainda a necessidade da invenção da escrita, que introduziu o homem na história rumo a construção de inúmeras civilizações.

Desde a pré-história até os dias de hoje, a agricultura sempre esteve profundamente ligada aos recursos hídricos e à irrigação. As primeiras civilizações humanas se desenvolveram às margens dos grandes rios –

Nilo, Tigre e Eufrates, Amarelo, Ganges, Jordão. “Água é Vida” é uma máxima atemporal que ouvimos desde cedo, pois sem ela não podemos sobreviver, plantar e manter a nossa saúde.

A agência espacial NASA, quando da divulgação das fotos do satélite do planeta Marte, destacou em suas primeiras análises fotográficas a possibilidade de haver água naquele planeta, causando uma euforia mundial pela possibilidade do suporte à vida.

Ora, um recurso tão importante como este, do qual depende a sobrevivência da espécie humana e a vida no planeta deveria ser preservado a todo custo por governos e população, entretanto não é isto que acontece, pelo menos nas dimensões requeridas.

É destaque constante na mídia a poluição dos rios, lagos, córregos sem maiores preocupações com as consequências, presentes e futuras, por parte de indústrias, da população e do Estado. Assim se quebra o frágil equilíbrio planetário que afeta a vida e a sobrevivência de populações e espécies animais devido à ignorância e/ou ganância de muitos.

Hoje enfrentamos ameaças com o aquecimento global, as mudanças climáticas e a desertificação, entre outros problemas.

A velocidade da degradação do meio ambiente é inversamente proporcional à conscientização da população e à própria educação ambiental. Infelizmente, práticas de desperdício equivocadas são generalizadas, assim como a permanência de um senso comum sobre o uso da água, este recurso natural precioso e ainda abundante, como se sua qualidade e quantidade não estivessem ameaçadas.

Continuamos a desmatar as florestas prejudicando as nascentes, extinguindo espécies e pondo em perigo muitas outras com o despejo de poluentes cada vez mais nocivos nos rios, lagos e mares e, por último, a impunidade quanto aos crimes ambientais, a inobservância da legislação e o desrespeito ao ambiente e à vida.

Hoje, no Brasil, se denuncia a aprovação de código florestal que já nasce corrompido e legitima os crimes ambientais. Tal cenário é agravado pela corrupção administrativa e política, inclusive dentro dos próprios órgãos de preservação e fiscalização ambiental e pela irresponsabilidade do poder público nas esferas federal, estadual e municipal com as questões ambientais, a par do poder econômico de grandes conglomerados favoráveis à exploração irracional dos recursos naturais.

Apenas para ilustrar o que foi dito, podemos citar, entre tantos exemplos de descaso e irresponsabilidade com os recursos hídricos e a poluição ambiental, que agora mesmo, no ano de 2011, na cidade de Seropédica, onde está sediada a Universidade Federal Rural Do Rio de Janeiro - UFRRJ, tem a instalação de um “Lixão” bem em cima do aquífero Piranema.

Este “Lixão”, que leva o nome pomposo de CTR – Centro de Tratamento de Resíduos – está instalado em área circunvizinha ao campus da UFRRJ. A indicação do local se deu por interesses políticos e econômicos, desprezando todos os relatórios técnicos, comprovados por vários estudos feitos por pesquisadores da Universidade e outros, informando que o local não era apropriado para tal empreitada.

Se “água é vida”, porque contaminar um aquífero importantíssimo não só para a região, mas para todo o estado? Por que a intransigência em não discutir e informar de forma democrática e aberta os riscos que envolvem essa ação e tentar achar outro lugar mais adequado visto que a comunidade universitária e a população se manifestam contrárias a esta decisão? Por que arriscar a contaminação não só dos recursos hídricos da região, mas do ar e do solo, colocando em risco a saúde da população?

Somente interesses econômicos escusos justificam tal crime ambiental. Os governantes que apoiam a instalação do lixão argumentam que haverá a instalação de sensores de vazamento para o aquífero, ignorando os riscos inerentes a falhas no sistema e a contaminação do mesmo, pois nenhuma multa ou sanção irá reduzir a contaminação de mananciais de água com o referido aquífero.

E mesmo com sensores de rompimento de manta de proteção, se por acaso os sensores alarmarem, como será solucionado tal problema? Como será removido rapidamente milhares de toneladas de lixo? Não é muito mais provável que a população e autoridades legítimas fiquem sem saber do vazamento?

A baixada fluminense do Rio de Janeiro já sofre há muito tempo com falta de água, e agora certamente terá menos um manancial. Estranhamente esta obra foi inaugurada sem alardes. Que político não faz propaganda da inauguração das suas obras?

Outro exemplo bem atual é o maior vazamento mundial de petróleo, ocorrido no Golfo do México no dia 20 de abril de 2010, uma semana após o presidente Barack Obama garantir a segurança da extração de petróleo em águas profundas nos mares dos EUA. Se passou mais de dois meses para ser resolvido e absurdas cifras foram gastas, cinco estados costeiros sofreram com o impacto do acidente, animais e pessoas ainda sofrem.

O homem mais poderoso do mundo garantiu a segurança e não conseguiu; isto é mais uma prova de que não basta apenas ter muito dinheiro, poder e tecnologia para as coisas funcionarem perfeitamente. Falhas e acidentes acontecem e, nos dias de hoje, nos níveis que elas podem ocorrer e ocorrem, esses acidentes são grandes catástrofes ambientais que não se recuperam, ou só se recuperam com muito dinheiro, muito trabalho e muito tempo.

Reichardt e Timm (2008), na figura 1, nos apresentam um gráfico, reproduzido abaixo, do crescimento da população mundial ao longo dos anos:

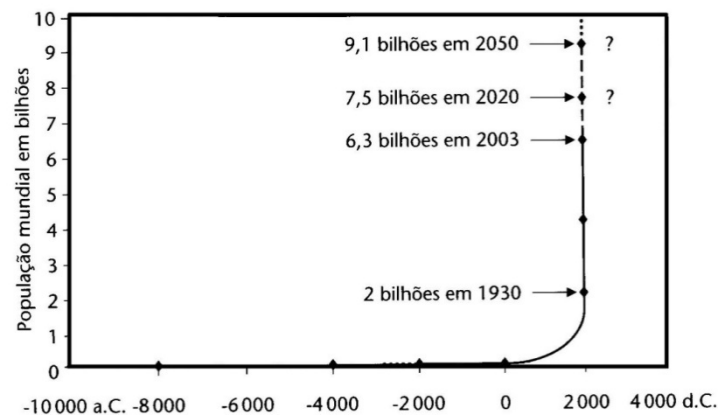


Figura 1 - Distribuição da População Mundial

Fonte: REICHARDT e TIMM, 2008, p.5

Este gráfico nos apresenta dados bastante preocupantes, pois vemos que a população saltou de cerca de 2 bilhões de pessoas em 1930 para 7 bilhões em 2010. Sabendo que a água é um recurso natural essencial à sobrevivência humana, o aumento da população mundial e o conseqüente crescimento da demanda de produção de alimentos a ela associada nos faz questionar sobre a quantidade e qualidade da água disponível para consumo humano, sendo que uma análise simples já aponta para a dimensão do problema.

Reichardt e Timm (2008) nos informam que, apesar da água ser encontrada em maiores quantidades do que qualquer outra substância pura, cerca de 97,5% da água é salgada. Os autores nos informam ainda que, dos 2,5% restantes de água doce, 69% se encontram sob a forma de gelo, em geleiras e neves eternas, 30% são subterrâneas e 0,9% se encontram em outros reservatórios não prontamente disponíveis. Apenas 0,3% da água se encontram em rios e lagos podendo ser consumida pelo homem.

Vemos assim, que a quantidade de água própria e disponível para o consumo é mínima, principalmente quando vemos o crescimento da população mundial.

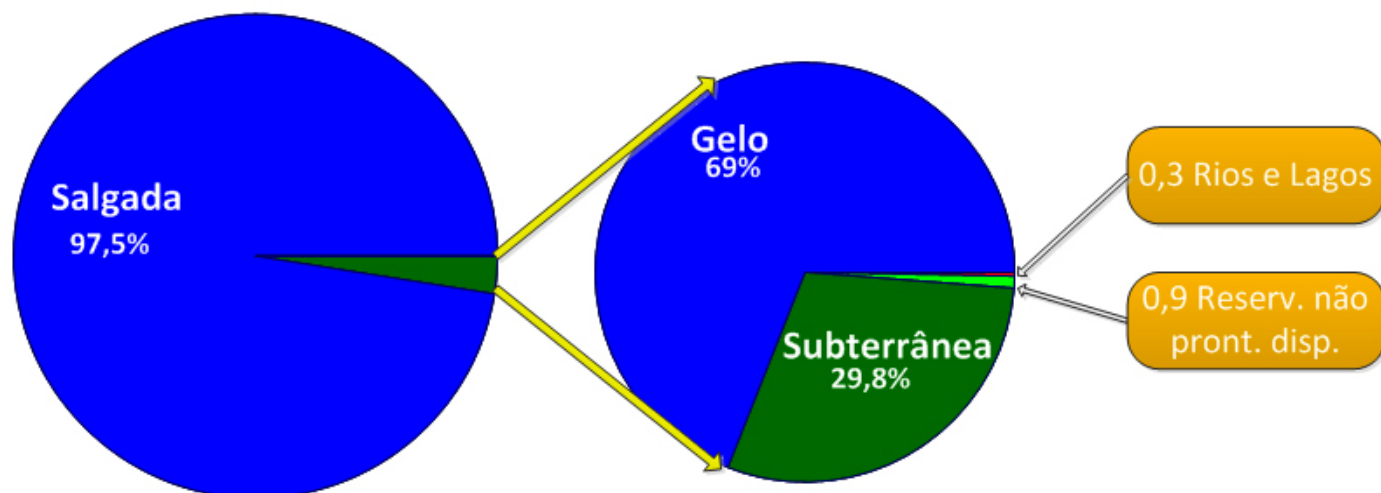


Figura 2 - Quantidades de Água no Planeta

Fonte: REICHARDT & TIMM, 2008

Reichardt e Timm (2008) ainda nos informam que 65% da água disponível para consumo é utilizada em atividades agrícolas, 22% pela indústria e 7% pela população das cidades, sendo que 6% é desperdiçada. Estes dados comprovam a importância da água para a produção de alimentos que, de forma primária, cabe à agricultura e pecuária que, por sua vez, requerem grande percentual e quantidade de água. Sabendo que os recursos hídricos não são renováveis, que estão cada vez mais escassos devido à própria ação danosa do homem, a qual se acresce o desperdício, vemos que projetos que viabilizem o uso racional da água na produção agrícola são extremamente necessários.

A preservação dos recursos hídricos é fundamental, sendo que a poluição da água é um dos principais problemas a enfrentar. Os autores Reichardt e Timm, (2008) classificam os diversos tipos de poluentes da água em três grupos:

- 1) Produtos biodegradáveis e substâncias orgânicas em geral;
- 2) Produtos químicos (minerais, metais pesados, ácidos e bases);
- 3) Produtos orgânicos não degradáveis (plásticos, detergentes, pesticidas, produtos da indústria petroquímica).

No caso dos produtos biodegradáveis (grupo 1), para que a sua decomposição ocorra, o oxigênio dissolvido na água é subtraído, causando grande impacto na fauna e na flora. Quanto aos produtos químicos e aos produtos orgânicos não degradáveis, estes entram na cadeia de alimento dos ecossistemas em determinadas fases, podendo chegar ao homem e causar intoxicação com metais pesados.

No caso das águas paradas ou semi-paradas, observamos o problema da eutroficação, isto é: o aumento de íons na água, sobretudo por nutrientes como o nitrogênio e fósforo. Tal fenômeno provoca o desbalanceamento do ecossistema fazendo com que certas plantas, tais como as algas, se desenvolvam mais que as outras, modificando as condições de oxigenação, penetração de luz, temperatura, fauna e flora. Este processo muitas vezes chega a ser irreversível, ou no mínimo requer o dispêndio de grandes somas de dinheiro para a recuperação da qualidade da água (REICHARDT e TIMM, 2008, p.6).

É importante salientar que a própria agricultura tem contribuído negativamente para a contaminação dos recursos hídricos e diminuição da água potável disponível, devido ao uso de técnicas inadequadas de plantio e mesmo irrigação. Sabemos que uma irrigação descontrolada

pode provocar a dispersão no sistema coloidal do solo, alterando suas propriedades físicas, e assim determinar sua salinização e torná-lo infértil. O Vale Imperial, na Califórnia, que já foi considerada a região mais produtiva do planeta nas décadas de 1960-1970, hoje, encontra-se ameaçado de salinização em decorrência das práticas de irrigação adotadas (REICHARDT e TIMM, 2008).

Da mesma forma, os fertilizantes, inseticidas e herbicidas utilizados na agricultura de forma exagerada, devido a sempre crescente demanda de alimentos, muitas vezes chegam às águas subterrâneas, contaminando os recursos hídricos dos quais a agricultura tanto depende.

Resumindo, podemos estabelecer uma relação intrínseca entre a importância da agricultura, a necessidade da água como mantenedora da vida e a crescente demanda por uma política e gestão pública comprometidas com o bom uso dos recursos naturais. Assim, procuramos demonstrar a importância da questão de uso adequado dos recursos hídricos na agricultura para a própria sobrevivência da humanidade.

Novas técnicas e produtos que melhorem o que já era feito desde a pré-história, inovando tecnologicamente, seja com a utilização de ferramentas informatizadas, educação ambiental e políticas públicas, podem auxiliar os produtores rurais na escolha das melhores opções de manejo do solo, visando a otimização dos recursos e ampliação da produção e, é claro, sempre se preocupando com a conservação do meio ambiente.

O uso de novas tecnologias da informação pode auxiliar o produtor agrícola na otimização da gestão dos recursos hídricos necessários ao consumo e irrigação, entre tantas outras demandas da produção agro-pecuária, contribuindo para a sua sustentabilidade econômica.

Assim, vimos que, desde a pré-história, a inovação tecnológica é essencial para o aprimoramento não só da produção agrícola, mas envolve todo o fazer humano. A inserção no PPGCTIA – Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação Agropecuária – favorece a elaboração e implementação de projetos voltados para o uso da inovação tecnológica, políticas públicas, integração regional e internacionalização na produção agropecuária, visando o seu aprimoramento, pois tudo que é pesquisado visa também a aplicação em outras regiões do Brasil e outros países, inclusive, como a parceria com a Argentina.

A formulação do problema de pesquisa e a elaboração dos objetivos estão voltadas para o uso racional da água na produção agrícola, a partir da implementação de sistemas computacionais de fácil acesso ao produtor, que o auxiliem na gestão e otimização não só dos recursos hídricos, mas de várias etapas da produção.

2. AGRICULTURA E TECNOLOGIA: FORMULANDO O PROBLEMA

Mostramos, anteriormente, de forma muito abrangente, questões referentes ao consumo da água, sua importância para a agricultura e os problemas associados ao uso inadequado de recursos hídricos, em especial o desperdício e a poluição da água. Estes problemas, extensivos a toda a população, atingem de forma dramática os agricultores, sendo maximizados principalmente quando se trata de pequenos e médios produtores rurais, visto que estes dispõem de recursos econômicos mais reduzidos e menor acesso à informação e às novas tecnologias.

A produção agrícola é um modo de produção econômica e, em nossa sociedade capitalista, visamos o lucro. O lucro é, portanto, um dos objetivos dos produtores rurais, necessário para continuar mantendo em funcionamento seu agronegócio. Para maximizar o lucro é importante reduzir os custos da produção e assim otimizar os ganhos.

Os principais custos do agronegócio são os gastos com fertilizantes, uso da água (irrigação) e eletricidade. A diminuição se dá através do melhor uso possível, isto é, usar apenas a quantidade necessária. Para isto é necessário que se faça uma modelagem matemática, para determinarmos as principais variáveis com o objetivo de otimização da função (CAVALCANTE, 2009). A modelagem em questão envolve equações diferenciais cuja solução envolve cálculos complexos; daí a necessidade de uma ferramenta computacional para tal.

Hoje em dia já dispomos de muita informação técnico-agrícola, mas persiste um grande problema a ser enfrentado: como consolidar estas informações de forma clara e simples, com a menor intermediação possível para o pequeno produtor?

Ainda falta muito para que a chamada inclusão digital seja uma realidade no país e, principalmente, no mundo rural (CAVALCANTE *et al.*, 2009). Se os grandes conglomerados agrícolas já utilizam a tecnologia digital a serviço da otimização da produção, ainda é escassa a utilização de equipamentos computacionais na agricultura, principalmente em se tratando de pequenas e médias propriedades rurais.

A proposta deste projeto é quebrar este paradigma, mostrando que através de um sistema computacional de fácil acesso para o usuário é possível otimizar a gestão do agronegócio, minimizando custos e aumentando a produção. Este projeto se propõe a desenvolver um sistema computacional que tenha como compromisso a simplicidade no modo de usar (filosofia “*userfriendly*”), por ser projetado com uma bem elaborada interface homem-máquina, intuitiva e capaz de efetuar os complexos cálculos matemáticos para o operador.

A grande velocidade do avanço da tecnologia dos computadores, traduzida pelo aumento da capacidade de processamento e a redução dos custos de aquisição dos mesmos, inclusive com a implementação de programas de financiamento do governo, favorece hoje a utilização de ferramentas computacionais para solução dos mais diversos problemas, com destaque, em nosso caso específico, para a produção agropecuária.

A necessidade de se reduzir a complexidade da gestão do agronegócio foi o motor da investigação sobre técnicas de otimização agrícolas. O acesso a novas tecnologias digitais e o uso de programas e sistemas de computadores que otimizem os recursos naturais e os implementos agrícolas necessários à produção tem como principal entrave a dificuldade da maioria dos produtores rurais de utilizarem tais recursos por desconhecimento e mesmo pela percepção equivocada de complexidade desta tecnologia.

O uso de uma tecnologia ‘amiga do usuário’ diminuiria a necessidade de capacitação mais complexa do produtor, aumentando seu o conhecimento pessoal (especialização) sobre a mesma com uma dinâmica muito maior, incentivando-o a utilizar e manter-se atualizado com as novas técnicas e ferramentas que vão surgindo.

3. O SIBRAPAL, O USO DA ÁGUA E A PRODUÇÃO AGRÍCOLA: OBJETIVOS

A finalidade do SIPRABAL, enquanto produto de inovação tecnológica, é participar das tomadas de decisões agrícolas em que a análise econômica e o uso racional dos recursos disponíveis (água, fertilizantes, terra, etc.) são relevantes.

Partindo da premissa que a administração de atividades agropecuárias requer conhecimentos técnicos e financeiros não distribuídos de forma igualitária entre pequenos, médios e grandes produtores rurais, o acesso a um sistema operacional de fácil utilização favoreceria a inclusão digital no campo associada à otimização dos recursos (CAVALCANTE 2010).

Assim, em situações onde a tomada de decisão está relacionada com a alocação de recursos limitados, o SIPRABAL favoreceria a função de decisão e a racionalidade do agricultor, pois disponibilizaria métodos eficientes que o auxiliariam na otimização dos recursos e da produção.

Espera-se, desta maneira, aumentar a eficiência do uso da água, a produtividade das culturas selecionadas para um determinado plantio e diminuição dos custos de produção, maximizando com isso os benefícios dos investimentos na agricultura irrigada.

Para a implantação de um projeto que, utilizando a tecnologia digital, favoreça a gestão da produção agropecuária pelo próprio produtor, é necessário recorrer a uma série de conhecimentos multidisciplinares. Assim, este trabalho mescla conhecimentos de diversas áreas, entre elas entendimento do sistema solo-planta e atmosfera (SSPA), o estudo de mecânica dos solos, a análise e modelagem matemática e o processamento computacional, dentre outros.

4. DESCRREVENDO A METODOLOGIA E APRESENTANDO REFERENCIAIS TEÓRICOS

Como explicitado, a elaboração de projeto vinculado ao Sistema Integrado de Produção e Receita Agrícola Maximizada com Balanço de Água no Solo requer conhecimentos de diversas áreas, dentre as quais se destacam a análise e modelagem matemática a par do próprio desenvolvimento do processamento computacional. Assim, é necessário detalhar conteúdos e programas pertinentes à modelagem matemática e os principais referenciais teóricos que os fundamentam.

4.1. Diagrama em blocos e Modelagem Matemática

Começaremos a descrever o módulo central **SIPI**, que esta sendo construído utilizando a linguagem de programação C e que representa um sistema de informação inteligente que tem como objetivo a administração e transporte de dados referentes ao clima, tais como: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura do bulbo molhado, insolação, velocidade do vento, radiação, precipitação, entre outros; ao ambiente: solo, variação da umidade, balanço hídrico, etc.; como também os referentes à área econômica e financeira: disponibilidade de capital, comercialização da produção (armazenamento, preços, etc.), disponibilidade de equipamentos, custos de mercado e produção, taxas de juros, custos de energia, entre outros (CAVALCANTE 2010).

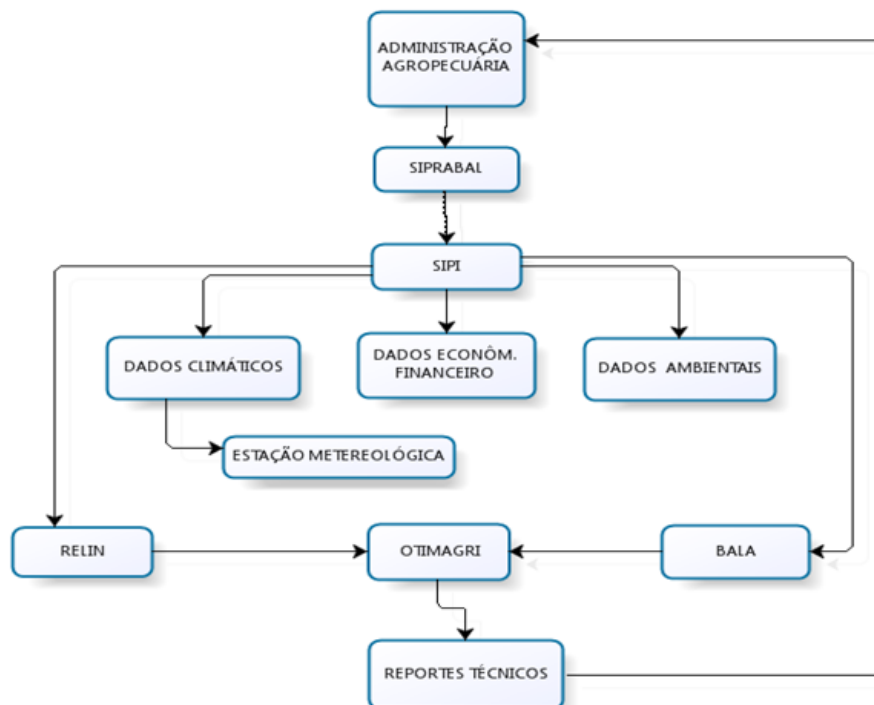


Figura 2–Diagrama em Blocos – SIPRABAL

O submódulo Dados Climáticos deverá estar em conexão com uma estação meteorológica. As nossas experiências de campo serão realizadas com estações localizadas no Brasil (Estação Meteorológica Automática da Fazendinha Agro Ecológico (UFRRJ-PESAGRO-RJ, Seropédica).

A importância dos dados climáticos é devida ao cálculo do parâmetro evapotranspiração de referência que é central para o desenvolvimento dos módulos **RELIN** e **BALA**.

A evapotranspiração de referência (ET_o) é a ocorrência simultânea da evaporação da água do solo e da transpiração da água através da planta. Sua quantificação refere-se ao total da perda de água para a atmosfera, da superfície do solo e das plantas.

O valor numérico de água evapotranspirada num sistema solo-planta-atmosfera é uma informação fundamental no planejamento, dimensionamento e manejo de cultivos irrigados.

De posse desta, podemos determinar corretamente a quantidade e o momento da aplicação de água pela irrigação, maximizando o uso dos recursos hídricos da região a nível econômico e ambiental.

O módulo **BALA** determina a variação da umidade do solo em função do tempo e, através do conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o), estima o consumo de água para irrigar.

A umidade do solo é um atributo de importância na experimentação agrícola e está relacionada com outros atributos que caracterizam o solo e as condições de cultivo. Este atributo é muito utilizado em projetos de irrigação, pois a decisão do momento de irrigar está associada à quantidade de água presente no solo.

Ao cessar a chuva ou a irrigação e a reserva de água da superfície do solo se esgota, o processo de infiltração chega ao fim, porém o movimento da água no solo continua. Esse movimento da água pós-infiltração, que aumenta a umidade das camadas mais profundas, é chamada de drenagem interna ou redistribuição da água.

O estudo do processo de redistribuição da água é importante quando se estudam as variações da umidade do solo em função do tempo. Conforme o tempo passa, a velocidade do processo de redistribuição diminui e as variações de umidade do solo tendem a cessar. Quando as variações da umidade cessarem, é estimada a quantidade (ou armazenamento) de água no solo.

O módulo **RELIN** efetuará cálculos de regressão linear que permitam a construção analítica das funções de produtividade e receita agrícola respectivamente, considerando que vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera interagem na determinação da produtividade das culturas agrícolas.

Existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, características de cada condição ambiental. A resposta das culturas à irrigação pode variar em diferentes tipos de solos, climas e também em decorrência da quantidade e frequência de aplicação de água. Desta maneira, é possível determinar as restrições operacionais, função e objetivo do modelo de programação matemática a ser resolvido no módulo **OTIMAGRI**.

No planejamento agrícola com recursos limitados (por exemplo, água, fertilizantes ou terra), geralmente procura-se selecionar as culturas e os meses de plantio que proporcionem a maximização da produção e da receita líquida, mantendo a melhor utilização dos recursos disponíveis (DE CARVALHO e SANCHEZ *et al.*, 2009). O problema é determinar um padrão de cultivo ótimo das culturas, de tal maneira que a receita líquida seja máxima quando é feita uma racionalização dos recursos.

No módulo **OTIMAGRI**, com os auxílios de informação dos módulos **RELIN** e **BALA**, é composto o modelo de programação não linear que representa o problema anterior, assim como as simulações e resposta da produção e receita líquida ótima através de reportes ou cronogramas de plantios e que podem ser importantes nas tomadas de decisões da respectiva administração.

Os módulos **BALA** e **RELIN** permitirão realizar o cálculo do balanço hídrico (variação da umidade no solo) e a determinação de intervalos ótimos de irrigação respectivamente.

4.2. Balanço Hídrico

A responsabilidade do módulo **BALA** pelo cálculo do balanço hídrico consiste principalmente em conhecer a variação temporal da umidade no solo.

Mostraremos como modelar a variação do teor de umidade no solo em função do tempo,

$$\theta = \theta(t) \left(\frac{\text{volume}}{\text{volume}} \right).$$

A ferramenta matemática utilizada é um sistema de equações diferenciais que simula a dinâmica ou movimento da água no solo. O modelo físico a ser considerado é tipo compartimental, no qual o perfil do solo é dividido verticalmente em horizontes e o dimensionamento (altura- h_i) de cada horizonte é definido a partir das características homogêneas do mesmo como, por exemplo, textura e estrutura do solo, variações na profundidade ou, ainda, variações de um horizonte para outro.

Quantificaremos então a quantidade de água disponível em cada horizonte num dado instante, consideramos que inicialmente a umidade estava distribuída uniformemente, ou seja, o teor de umidade é o mesmo em qualquer volume de solo. A motivação de um modelo compartimental vem do fato que os horizontes sofrem diferentes influências.

Em destaque, o primeiro horizonte, que tem contato com a atmosfera, ganha água por precipitação (chuva e/ou irrigação) $f \left(\frac{\text{volume}}{(\text{área})(\text{tempo})} \right)$ e perde por evapotranspiração $e \left(\frac{\text{volume}}{(\text{área})(\text{tempo})} \right)$, além de perder água pelo processo de redistribuição; por sua vez, o segundo horizonte, que tem contato com o primeiro, ganha água que o primeiro horizonte perdeu por redistribuição e perde água para o terceiro horizonte, também pelo processo de redistribuição.

Neste projeto, consideramos um solo com espaço poroso (α) definido por $\alpha = \frac{v_t - v_s}{v_t}$, em que v_t e v_s é o volume total do solo e v_s o volume de solo ocupado pelas partículas sólidas.

Esse espaço é ocupado por ar ou água. Conforme acontecem as precipitações, o volume de água penetra no solo e o espaço até então ocupado pelo ar diminui. Se essa quantidade de água ocupar todo o espaço poroso, então o solo se encontrará saturado.

A umidade neste solo será de saturação $\theta_s \left(\frac{\text{volume}}{\text{volume}} \right)$, que é a umidade máxima que um solo (ou horizonte de solo) pode conter. Sendo assim, pode-se dizer que um volume de água penetra no solo até que o espaço poroso se encontre totalmente preenchido, ou seja, até que o solo se encontre saturado.

A porosidade, da mesma forma que a umidade, é adimensional ($m^3 \cdot m^{-3}$) e, em geral, é expressa em porcentagem. Logo se $\alpha = 0.500$, significa que 50% de uma amostra de solo pode ser ocupado por ar e água. Assim, uma camada de solo de dimensão h_1 tem espaço poroso α equivalente a uma altura $\alpha \cdot h_1$. No caso em que o espaço poroso está todo ocupado por água, ocorre que $\theta_s = \alpha$. Portanto, se uma altura h_1 de solo estiver saturada então o espaço poroso α de h_1 equivale a uma altura de $\theta_s \cdot h_1$, sendo θ_s a umidade de saturação da camada correspondente à altura h_1 .

Em relação ao processo de redistribuição da água, consideramos que ele pode ser quantificado pelo crescimento da umidade decorrente da contribuição de um horizonte para outro vezes a condutividade hidráulica em função da umidade; definida como:

$k(\theta) = k_s e^{\lambda(\theta - \theta_s)}$, em que $k_s \left(\frac{\text{volume}}{(\text{área})(\text{tempo})} \right)$ representa a condutividade hidráulica para o solo saturado num determinado horizonte, λ uma constante dependente do solo (adimensional) e θ_s a umidade para o solo saturado do respectivo horizonte.

As experiências numéricas serão baseadas em dois modelos matemáticos. No primeiro, calculamos o crescimento da umidade decorrente da contribuição de um horizonte para outro, através de uma adaptação da equação logística usada historicamente para calcular o crescimento populacional, dada por: $\frac{dy}{dt} = \delta \left(1 - \frac{y}{\sigma}\right) y$, sendo $y(t)$ a população de uma espécie dada no instante t , δ a taxa de crescimento intrínseco e σ um limitante populacional, também chamado de capacidade de suporte.

Já no segundo modelo, usamos a equação de Gompertz que diz que: $\frac{dy}{dt} = ry \ln\left(\frac{M}{y}\right)$, onde r e M são constantes positivas. Desta maneira, os sistemas de equações diferenciais a serem considerados para n horizontes ou compartimentos são:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{f}{\theta_{s_1} h_1} - \frac{\epsilon}{\theta_{s_1} h_1} - \frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \left(1 - \frac{\theta_2}{\theta_{s_2}}\right) \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \left(1 - \frac{\theta_2}{\theta_{s_2}}\right) - \frac{k_2(\theta_2)}{\theta_{s_2} h_2} \theta_2 \left(1 - \frac{\theta_3}{\theta_{s_3}}\right) \\ \vdots \\ \frac{d\theta_n}{dt} = \frac{k_{n-1}(\theta_{n-1})}{\theta_{s_{n-1}} h_{n-1}} \theta_{n-1} \left(1 - \frac{\theta_n}{\theta_{s_n}}\right) - \frac{k_n(\theta_n)}{\theta_{s_n} h_n} \theta_n \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_1}{dt} = \frac{f}{\theta_{s_1} h_1} - \frac{\epsilon}{\theta_{s_1} h_1} - \frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \ln\left(\frac{\theta_{s_2}}{\theta_2}\right) \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \ln\left(\frac{\theta_{s_2}}{\theta_2}\right) - \frac{k_2(\theta_2)}{\theta_{s_2} h_2} \theta_2 \ln\left(\frac{\theta_{s_3}}{\theta_3}\right) \\ \vdots \\ \frac{d\theta_n}{dt} = \frac{k_{n-1}(\theta_{n-1})}{\theta_{s_{n-1}} h_{n-1}} \theta_{n-1} \ln\left(\frac{\theta_{s_n}}{\theta_n}\right) - \frac{k_n(\theta_n)}{\theta_{s_n} h_n} \theta_n \end{array} \right. \quad (2)$$

Em ambos os sistemas, as razões $\frac{f}{\theta_{s_1} h_1}$, $\frac{\epsilon}{\theta_{s_1} h_1}$ e $\frac{k_i(\theta_i)}{\theta_{s_i} h_i}$ representam o volume de água que entra em um volume total de poros por unidade de tempo, um volume de água que sai de um volume total de poros por unidade de tempo e a passagem de um volume de água por unidade de tempo respectivamente. Note também que, em (1) e (2), é considerada a disputa pela água entre os compartimentos de solo e a atmosfera. Porém, pode-se observar que, à medida que θ_2 diminui, a perda de água do compartimento 1 dada por $\frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \left(1 - \frac{\theta_2}{\theta_{s_2}}\right)$

em (1) ou por $\frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \ln\left(\frac{\theta_{s_2}}{\theta_2}\right)$ em (2) também diminui; logo, a transferência de água do compartimento 1 para o compartimento 2 tende a ser menor. Mais ainda, se o segundo horizonte se satura, então $\theta_2 = \theta_{s_2}$ e

$\theta_1 \left(1 - \frac{\theta_2}{\theta_{s_2}}\right) = 0$; isto é, não há passagem de água do primeiro para o segundo horizonte. Analogamente,

$$\frac{k_1(\theta_1)}{\theta_{s_1} h_1} \theta_1 \ln\left(\frac{\theta_{s_2}}{\theta_2}\right) = 0.$$

Uma vez que o módulo BALA realiza o cálculo do balanço hídrico do solo através da solução do sistema (1) ou (2), é possível determinar os limitantes superiores e inferiores das lâminas de água viáveis para cada cultura considerada no módulo OTIMAGRI, em que são feitos os cálculos dos intervalos ótimos de irrigação para cada cultura.

4.3. Determinação de Intervalos Ótimos de Irrigação

Quando a irrigação está restrita pela disponibilidade limitada de água ou pelo limite da capacidade do sistema de irrigação e a terra é o fator limitante da produção, a água economizada pela redução da profundidade de irrigação pode ser utilizada para irrigar um acréscimo de terra.

Sejam w_u e w_l os limitantes superior e inferior da lâmina de água obtidos do módulo **BALA**. Nesse caso, o problema é determinar uma lâmina ótima em relação à profundidade aplicada e a área a ser irrigada; isto é, procura-se maximizar a receita líquida total sujeita às restrições de recursos pré-fixados e a uma estrutura de preços e custos pré-determinados.

Seja $y(w)$ a função de produção ou resposta de uma cultura em função da lâmina de água w (mm) e $w_m = \text{Argmax} \{y(w): w_l \leq w \leq w_u\}$ e $y_m = y(w_m)$. Aqui, $\text{Argmax} \{.\}$ denota a variável ou argumento; neste caso, lâmina de água, onde se alcança o valor objetivo máximo (produção) satisfazendo as limitações impostas. Neste projeto consideramos como receita líquida (US\$. ha⁻¹ ou US\$. m⁻³) a relação dada por:

$I(w) = \frac{wT}{w} (P_c y(w) - c_0 - c_w \cdot w)$ em que w_T (m³) representa o total de água disponível, P_c o preço da cultura (US\$.kg⁻¹), c_0 o custo fixo de produção (US\$.ha⁻¹) e c_w o custo de água US\$. (mm.ha)⁻¹.

É conhecido na literatura que a lâmina de água que maximiza a receita líquida representa uma lâmina ótima na irrigação com déficit; isto é, interessa calcular aproximadamente $w_* = \text{Argmax} \{I(w): w_l \leq w \leq w_u\}$ e $I_* = I(w_*)$ quando a disponibilidade de terra é o fator limitante à produção.

Outra lâmina de interesse é aquela que produz receita líquida $I(w)$, igual a $I(w_m)$. Esta lâmina equivalente foi denotada por w_{e*} .

Fundamentalmente, procura-se construir um procedimento computacional baseado no método barreira logarítmica (MBL) para a procura de intervalos ótimos de irrigação entre a lâmina que maximiza a produção e a lâmina que maximiza a receita líquida com limitações hídricas.

O MBL é o mais antigo método de pontos interiores, com prestígio radicalmente incrementado após a revolução que se seguiu ao trabalho de Karmarkar (1984). MBL é um processo de penalização. Nele, a não satisfação (ou o “risco de não-satisfação”) de uma restrição é sancionada com um acréscimo da função objetivo, de maneira que a função que define a restrição é eliminada como tal e substituída por um termo introduzido no objetivo, que tende a menos infinito quando o ponto se aproxima da fronteira do conjunto factível.

As estratégias de penalização estão vivas na otimização contemporânea por sua simplicidade e capacidade de se enriquecer automaticamente com progressos realizados na resolução de problemas mais simples. Serão realizados experimentos numéricos baseados em funções respostas de culturas previamente selecionadas e desenvolvidas em solos Brasileiros e solos Argentinos.

Em regiões áridas ou semi-áridas e também em regiões úmidas, a irrigação com déficit depende da utilização racional dos recursos.

A maioria das culturas possui períodos críticos, durante os quais o suprimento inadequado de água causa reduções na produção e alterações no desenvolvimento das culturas. Segundo English e Raja (1996) lâminas excessivas de água, além de carregar mais custos na produção, também são prejudiciais por reduzirem o rendimento da cultura; por outro lado, lâminas insuficientes expõem a cultura a condições de deficiência hídrica, reduzindo seu potencial produtivo.

Considerando que o comportamento de uma cultura depende da quantidade e frequência de irrigação que sejam administrados durante o ciclo fenológico, as funções de produção, de receitas e custos representam ferramentas fundamentais nos estudos econômicos relativos ao planejamento da irrigação.

Se estas funções fossem conhecidas com precisão, seria possível selecionar com exatidão o nível ótimo de água para uma situação em particular, mas tais funções estão restritas a grandes variações, dificultando as previsões. Variações climáticas, atributos físicos e hídricos do solo, uniformidade de distribuição da água pelo sistema de irrigação e muitos outros fatores, tornam difícil prever a produtividade das culturas.

Da mesma maneira, por serem variáveis os preços e insumos agrícolas, temos um elevado grau de incerteza nas estimativas (FRIZZONE *et al.* 2005). A incerteza na produção está associada ao risco econômico e através de estratégias da irrigação com déficit é possível sua redução, mas não sua eliminação.

Segundo Frizzone *et al.* (2005), este é um problema relevante em irrigação, pois não se pode conhecer com exatidão a forma da curva de produção em função da água aplicada que maximizará a receita líquida. Também, a quantidade ótima de água representa apenas um ponto sobre a curva de produção, tendo pouco significado prático. Mesmo assim, é possível determinar um intervalo no qual a receita líquida é maior que aquela obtida quando se utiliza a quantidade de água que maximiza a produção (w_m).

Nos últimos quarentas anos, a literatura vem mostrando que, em certas circunstâncias, as economias do déficit de irrigação se encontram na eficiência da irrigação aumentada, nos custos reduzidos de irrigação e nos custos oportunos da água (ENGLISH e RAJA, 1996).

Adicionalmente, uma decisão que usa menos água pode permitir ao produtor reduzir o capital e outros custos fixos. A experiência prática diz que quando a terra constitui um fator limitante à produção, a utilização de irrigação com déficit permite um maior retorno econômico que a irrigação completa (ENGLISH, 1990).

As vantagens potenciais do déficit de irrigação parecem bastante significantes, particularmente em uma situação onde a água e/ou a terra é limitada e os riscos associados são aceitáveis.

Supondo que o sistema de irrigação utilizado aplica água segundo um modelo teórico de distribuição, existe uma lâmina de água ótima que deve ser infiltrada de forma a minimizar a redução da receita líquida esperada quando temos um déficit de água na área. Esta lâmina é chamada de lâmina ótima de irrigação, ou seja, é a lâmina média de água que deve ser infiltrada no solo para proporcionar a máxima receita líquida, minimizando a redução da receita líquida pelo déficit de água.

Se a terra é limitada, a estratégia de irrigação ótima é a quantidade de água que maximiza a receita líquida derivada de cada unidade de terra; isto é, maximiza o diferencial entre as curvas descritas pela forma quadrática da função receita e a forma linear da função de custos.

Tal quantia é denotada por w_s e é pouco menos que w_m , considerando que ambas as curvas decrescem à esquerda de w_m (ENGLISH, 1990). Se usarmos mais água que w_m , o lucro é reduzido. De acordo com a teoria econômica, w_s é a lâmina onde o valor do produto marginal é igual ao valor do custo marginal; geometricamente, quer dizer onde o declive da função custo é igual ao declive da curva receita líquida.

Se o uso da água é reduzido abaixo de w_s , podemos achar uma lâmina de água onde a receita líquida por unidade de terra é igual à receita líquida em w_m . Esta lâmina será denotada por w_{gs} e é chamada de equivalente. No intervalo $[w_{gs}, w_m]$ a irrigação parcial (com déficit) será mais rentável que a irrigação plena (para a máxima produção).

A extensão desse intervalo pode ser interpretada como uma indicação do grau de segurança no manejo da irrigação parcial. Se o intervalo é relativamente amplo, o risco associado à decisão pode ser pequeno. Um intervalo pequeno implica maior risco e necessidade de um cuidadoso manejo da irrigação. Dessa forma, conhecido esse intervalo e a incerteza da estimativa da quantidade ótima de água, a decisão de quanto irrigar pode ser tomada com mais segurança (ver FRIZZONE *et al.* 2005).

Finalmente, o módulo OTIMAGRI representa um procedimento computacional decorrente do método barreira logarítmico (MBL) para a determinação de intervalos ótimos de irrigação baseados no cálculo da

lâmina de água. Este módulo permite maximizar a produção e a lâmina de água que maximiza a receita líquida com restrições hídricas quando a disponibilidade de terra é fator limitante da produção e existe uma estrutura de custos e preços pré-fixados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sem dúvida que os incrementos populacionais nos últimos anos têm levado a altas taxas de crescimento da população agrícola e alimentar. Por outra parte, a degradação dos solos, os manejos inadequados da água, fertilizantes e defensivos têm inviabilizado o aumento da produção agrícola compatível com a população presente e futura. É daí que surge a inquietude mundial pela segurança alimentar.

A produção de alimentos tem sido tema de estudos de diversas instituições internacionais como a FAO (Organização para a Alimentação e a Agricultura da ONU), as ONGs (Organizações não Governamentais) e instituições oficiais de governos, onde se mostram estimativas e previsões realmente preocupantes.

No caso do Brasil e ante essa preocupação mundial pelos alimentos, o atual governo vem mostrando soluções viáveis e ótimas do problema alimentar através da geração de políticas públicas que permitem elevar a produção de alimentos e o combate à fome. Brasil representa hoje uma potencia mundial de alimentos e, como tal, deve manter sua luta contra a significativa desigualdade alimentar entre as nações; por exemplo, parece desequilibrado que as nações desenvolvidas consumem 50% dos alimentos mundiais e correspondem a 25% da população do planeta. É claro que o desperdício na produção, armazenamento, transporte e consumo de alimentos também representam fatores relevantes nessas desigualdades.

Através do MERCOSUL, o Brasil e a Argentina têm mostrado interesse e apoio ao desenvolvimento de tecnologias (acessíveis) que auxiliem ao planejamento da produção agrícola dos pequenos e médios produtores rurais (agricultura familiar). É necessário incrementar o assessoramento técnico e tecnológico para que o produtor adquira credibilidade financeira.

No caso Brasileiro, a agricultura familiar tem reconhecimento jurídico, mas pouco acesso ao crédito agrícola por não saber comprovar tecnicamente a viabilidade ótima de um determinado plantio. Com o desenvolvimento de códigos computacionais de fácil acesso como o que estamos desenvolvendo, o SIPRABAL, achamos que está se contribuindo para o avanço da eficiência do uso da água, o planejamento ótimo de plantios e, em geral, ao fortalecimento tecnológico da agricultura irrigada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALCANTE, J. A. C. **Notas de aula de Cálculo I para Administração**. DTL/IM/UFRRJ – 2009.

CAVALCANTE, J. A. C. *et al.* **Inclusão Digital: Ampliando Oportunidades**. Dourados, MS, 4º CBEU, 2009.

CAVALCANTE, J. A. C.; SANCHEZ, A. R. D.; OLIVEIRA, R. F.; BACCIS, M.; **Projeto de Doutorado: Sistema Integrado de Produção e Receita Agrícola Maximizada com Balanço de Água no Solo - SIPRABAL/2010-2013**.

DE CARVALHO, D. F.; SANCHEZ DELGADO, A. R.; DE OLIVEIRA, R. F.; DA SILVA, W. A.; DO FORTE, V. L. Maximização da produção e da receita agrícola com limitações de água e nitrogênio utilizando pontos interiores. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 321-327, abr/jun 2009.

ENGLISH, M. J.; RAJA, S. N. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 32, p. 1-14. 1996.

ENGLISH, M. J.; SOLOMON, K. H.; HOFFMAN, G. J. A paradigm shift in irrigation management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 5, p. 267-277, 2002.

ENGLISH, M. J. Deficit irrigation. I: Analytical Framework. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering of ASCE**, New York, v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.

GUIA, L. Disponível em: http://www.notapositiva.com/trab_professores/textos_apoio/historia/dopaleoaoneol.htm, Acesso em: 04 de janeiro de 2011.

KARMARKAR, N. A New Polynomial-time Algorithm for Linear Programming. **Combinatorica**, Berlin, v. 4, n. 2, p. 373 – 395, 1984.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ZOCOLER, J. L.. **Planejamento da Irrigação. Análise de Decisão de Investimentos**. 1 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 627 p.; 2005.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**. Barueri: Ed. Manole, 2008. ISBN 85-204-1773-6.

EMPLOYMENT OF RESOURCES ON ADEQUATE MEASURE: A COMPUTATIONAL TOOL FOR AGRICULTURAL OPTIMIZATION

Abstract

The present article is presented in VII CNEG 2011 and was expanded. This paper describes a computational tool developed for agriculture - SIPRABAL (Integrated Production System and Maximized Agricultural Revenue with balance on soil). This system has taken part on research related to course for elaboration of thesis on binational (PhD on Agromathematics at UFRRJ – Federal University of Rio de Janeiro, Brazil and URNC – Rio Cuarto National University, Argentina).

The main purpose of the project has been the composition of a computational code, in according to “user friendly” philosophy; therefore increasing probabilities for an easier access to the user, even for those ones not so experts on computer handling, at all.

Input complex data will be used by the system, as well as, will computationally be accumulated, allowing to choose among available productive resources utilization, satisfying certain pre-established aims related to soil, humidity and environment, disposing results to low income farmers, in order to clearly and directly answering them, as well.

This sort of system can be employed on limited resources situations, supporting the smallholder on his making decision and providing him effective methods and information.

Taking into account that farming activities managements demands technical and financial knowledges, the purpose of SIPRABAL as a product of technological innovation has been sharing on farming making decisions whereabouts economical analysis and rational use of available resources (water, fertilizers, land, etc...) have been relevant.

Increase of the effectiveness on water use, selected cultures yield for an adequate tillage and production costs decrease maximizing investments on farming irrigation through an accessible system utilization to the peasant it might be expected, as well.

Key-words: Agromathematics, communication and information technologies, water resources economy, agricultural optimization,