

MONITORAMENTO DE QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA E SENSORIAMENTO REMOTO

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo

RESUMO--- O objetivo desse artigo é demonstrar, a partir de exemplos, como a tecnologia de sensoriamento remoto dos atuais Sistemas de Observação da Terra pode dar suporte à produção de informações quantitativas e qualitativas sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Além da avaliação da tecnologia disponível faz-se, também uma prospecção dos sistemas projetados para a próxima década, e sua provável contribuição para a gestão dos recursos hídricos. Para atingir a esse objetivo o texto focaliza os seguintes aspectos: 1) conceitos fundamentais de sensoriamento remoto, indispensáveis à compreensão da tecnologia e de suas limitações; 2) uma breve revisão das informações relevantes ao manejo dos recursos hídricos no tocante à quantidade e qualidade e as lacunas passíveis de serem preenchidas por sistemas de observação terrestre; 3) exemplos de aplicação de sistemas operacionais de sensoriamento remoto na extração de informações relevantes ao manejo de recursos hídricos, com ênfase em estudos realizados no Brasil; 4) perspectivas futuras de aplicações de sensoriamento remoto ao manejo à gestão de recursos hídricos. .

ABSTRACT--- The objective of this paper is to demonstrate the present capabilities remote sensing technology of Earth observation systems for quantitative and qualitative estimates of parameters contributing to the assessment of the quantity and quality of water resources, giving a series of examples. Moreover, this paper also investigates the improvements expected in the future and gives a prospective view of the remote sensing technology. To reach this objective this paper focus on the following aspects: 1) basic concepts for a better understanding of the limits of the remote sensing technology; 2) a quick review of information requirements for water resources management and how remote sensing information can fill the traditional approaches gaps; 3) examples of operational remote sensing tools application to water resource management, with emphasis on Brazil case studies; 4) A prospective view on future capabilities remote sensing for water resources management.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, qualidade e quantidade de água, gestão de recursos hídricos.

1 – INTRODUÇÃO

A água doce do planeta vem sendo explorada e degradada a uma taxa acelerada pelo o que Wetzel (2001) chamou de “crescimento demotécnico”, ou seja, a forma de crescimento que reúne o efeito combinado do aumento populacional e da ampliação crescente de produção e consumo de água para atender aos avanço tecnológico e o crescimento econômico. A tabela 1 permite comparar as necessidades fisiológicas da população humana, com aquelas derivadas do crescimento tecnológico. A análise desses dados cria a ilusão que há água em abundância, por que o consumo per capita, de origem tecnológica, embora 1000 vezes superior ao consumo fisiológico, ainda se encontra bastante distante da disponibilidade média. Essa percepção equivocada resulta do fato de que a água serve a outros propósitos relevantes ao ser humano que não se limitam a seu consumo fisiológico e tecnológico.

Tabela 1 – Disponibilidade hídrica e os diferentes tipos de consumo (Fonte: Wetzel, 2001)

Disponibilidade hídrica total	37.599 km ³ ano ⁻¹
Disponibilidade diária per capita admitindo-se distribuição isotrópica e população mundial de 5,5 bilhões	18.680 litros
Consumo fisiológico	2 litros pessoa ⁻¹ dia ⁻¹
Consumo doméstico médio decorrente da demanda tecnológica	250 litros pessoa ⁻¹ dia ⁻¹
Consumo industrial médio	1.500 litros pessoa ⁻¹ dia ⁻¹
Consumo agrícola	Variável em função das condições climáticas

A disponibilidade de água é um requisito essencial para a prosperidade, bem estar e saúde humana, e portanto, para o funcionamento sustentável dos ecossistemas aquáticos e terrestres. Em 1995, um relatório do Banco Mundial já mencionava que cerca de 80 países concentrando cerca de 40 % da população do globo, já estavam sujeitos à escassez de água, com projeções de agravamento do quadro, a partir do crescimento da população, pressão para o desenvolvimento econômico, aumento das concentrações urbanas e obsolescência e inadequação dos sistemas de tratamento de água em países em desenvolvimento (Batrick, 2005).

Mesmo em países como o Brasil, com abundância de recursos hídricos, há que se ressaltar que a escassez da água ainda é uma das principais causas de empobrecimento da população, devido à distribuição desigual dos recursos entre regiões geográficas. A premissa de distribuição isotrópica dos recursos hídricos e da população não se aplica na prática. A Região Norte, com o maior potencial hídrico possui baixa densidade populacional, enquanto o Nordeste tem alta concentração populacional, e alta demanda para vários usos, e baixa disponibilidade hídrica. A região Sudeste, por sua vez, embora tenha uma relativa abundância, a demanda é tão elevada que estes não mais fazem à disponibilidade natural (Rebouças, 2002).

A falta de conhecimento sobre o ciclo hidrológico fez com que o século XX assistisse à crescente manipulação direta dos cursos d'água (represamento, transposição, drenagem de planícies aluviais, retificação de canais) cujas conseqüências sobre a dinâmica da água na fase terrestre do ciclo hidrológico, não foram totalmente previstas e cujas conseqüências via enchentes recorrentes todos os verões nas grandes cidades brasileiras, recrudescimento de doenças de veiculação hídrica, poluição e eutrofização.

Um exemplo da priorização de obras de engenharia sobre ações de gestão e ordenamento do territorial é a bacia do Rio Paraíba, que a partir de 1960 foi submetida a sucessivas manipulações diretas do canal fluvial (represamento, retificação do canal, construção de sistema de polders), e que

hoje enfrenta graves problemas no tocante à qualidade e quantidade de água, tornando o abastecimento doméstico precário e o processo de tratamento cada vez mais oneroso. Paralelamente, ao crescimento de grandes cidades às margens do rio Paraíba, assiste-se à degradação do ecossistema aquático. Além disso, muitas cidades do Vale do Paraíba do Sul experimentam a contradição de estarem sujeitas à escassez de água nos períodos de seca mais prolongada, e a inundações constantes nos meses de chuva, em decorrência da ocupação desordenada várzea, páleo-várzea e terraços aluviais. A impermeabilização dessas áreas retirou do sistema natural a capacidade de armazenar água para a manutenção do nível freático nos períodos secos e arrefecer o ímpeto do escoamento superficial nos meses chuvosos. O processo de destruição das áreas alagáveis (wetlands) se encontra em estágio muito mais avançado nos continentes europeu e asiático, e foi realizado antes de se ter conhecimento científico sobre a função dessas áreas no funcionamento dos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos. A partir da ampliação do conhecimento sobre o seu papel fundamental para a regulação do volume e da qualidade da água, muitas das áreas alagáveis tornaram-se objeto de reconstrução ou restauração (Beilfuss e Barzen, 1994).

Essa manipulação direta dos cursos de água também tem impactos na qualidade da água de superfície que resultam na degradação de extensos *habitates* aquáticos e terrestres, interferindo, portanto, na biodiversidade, com conseqüências na manutenção sustentável da pesca em muitos locais, destruindo assim modos de vida de comunidades tradicionais.

Além da carência de informações sobre os impactos de longo prazo que tais modificações trazem sobre a qualidade e quantidade da água, há também falta de conhecimento sobre a qualidade das águas superficiais em grande parte do território nacional.

Segundo Cordeiro (2006), a rede hidrológica básica monitorada pela Agência Nacional de Águas (ANA) coleta e analisa dados de qualidade de água em 969 rios do território brasileiro, com base em métodos convencionais de coleta, sendo realizadas 4 campanhas por ano, em 1276 estações, o que representa uma densidade de amostragem inferior a 15×10^{-5} amostras por km^2 . Além da cobertura insuficiente, o sistema de monitoramento também não responde com agilidade às necessidades de informação devido à demora entre a coleta e sua disponibilidade para uso, pois o tempo médio de disponibilidade dos dados varia de três a cinco meses após a sua coleta. A rede básica a ANA também é composta por 2602 estações para medidas de precipitação, 1720 estações fluviométricas e 425 estações sedimentológicas.

É claro que existem outras redes de coleta de dados para atender propósitos específicos como as das empresas hidrelétricas, de abastecimento de água e demais agências estaduais e municipais. A existência de várias agências públicas e privadas coletando dados sobre a qualidade e quantidade de água cria um problema adicional para a gestão que é a ausência de protocolos unificados no

tocante às metodologias de coleta e análise de dados, o que na maioria das vezes torna difícil sua assimilação e análise visando à gestão dos recursos hídricos.

É nesse contexto que a tecnologia de sensoriamento remoto se insere como fonte de informação a ser integrada às convencionais. Embora a tecnologia de sensoriamento remoto esteja disponível e seja amplamente utilizada em vários campos do conhecimento como é o caso da gestão da produção agrícola (INPE, 2007a), previsão meteorológica (INPE, 2007b) sistemas de alerta de fogo (INPE, 2007c) e de desflorestamento (INPE, 2007d), seu uso pela comunidade gestora de recursos hídricos é ainda insipiente.

Existem várias explicações para isso: 1) em primeiro lugar, até o momento não existe um sistema de observação da Terra configurado com o objetivo único de dar suporte ao monitoramento das propriedades das águas doces; 2) por isso, os dados existentes não fornecem informações segundo as especificações dos usuários em termos de frequência, resolução e acurácia. Um outro problema identificado é a pequena interação entre a comunidade de usuários e os produtores de dados de modo que os primeiros possam especificar os seus requisitos de informação. Assim sendo, existem muitos dados passíveis de se transformar em informação, mas que não são utilizados por falta de uma compreensão das necessidades mútuas. Outro aspecto relevante é que há sempre um lapso de tempo entre a geração dos dados e sua liberação para a comunidade de usuários, embora esse não seja um problema específico dos dados de sensoriamento remoto.

Há também, segundo várias análises do problema, uma falta generalizada de conhecimentos mais básicos sobre a tecnologia, o que muitas vezes faz com que os potenciais usuários criem expectativas irrealistas sobre o seu potencial, levando a um posterior descrédito. O objetivo dessa comunicação é, portanto, apresentar de forma mais realista os limites da tecnologia no atual estado de desenvolvimento tecnológico bem como lançar um pouco de luz para o seu futuro, de modo a, de certa forma lançar um pouco de luz sobre o problema e assim estimular um uso mais consistente dos dados existentes.

2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Pode-se definir sensoriamento remoto como a tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos da superfície terrestre a partir da detecção e mensuração das mudanças que estes impõem ao campo eletromagnético (Elachi, 1987).

Com o advento dos satélites meteorológicos a partir de 1960 e dos satélites de recursos naturais a partir de 1970, a tecnologia de sensoriamento orbital passou ser concebida como um sistema de aquisição de informações sobre a superfície terrestre com base no registro e análise das alterações impostas à radiação eletromagnética ao interagir com os seus componentes.

Didaticamente esse sistema pode ser dividido em um Subsistema de Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto e um Subsistema de Produção de Informações.

O Subsistema de Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto é formado pelos seguintes componentes: Fonte de Radiação, Plataforma (Satélite, Aeronave), Sensor, Centro de Dados (Estação de Recepção e Processamento de Dados de Satélite e Aeronave). O Subsistema de Produção de Informações é composto Sistemas de Aquisição de Informações de Solo para Calibragem dos Dados de Sensoriamento Remoto; Sistema de Processamento de Imagens e Sistema de Geoprocessamento.

Em termos de Fontes de Radiação para o sensoriamento remoto da superfície terrestre há basicamente o Sol, a Terra, e as fontes artificiais de microondas, representadas pelas antenas dos sistemas de radar, e de luz visível representadas pelos sistemas laser de amplificação da luz pela emissão estimulada de radiação. A radiação incidente sobre a superfície interage com ela, sendo refletida de volta para os sensores à bordo de plataformas inseridas em diferentes altitudes.

Os sensores são os sistemas responsáveis pela conversão da energia proveniente da superfície em um registro permanente na forma de imagem ou gráfico que permita associar a distribuição da energia que deixa um dado objeto com suas propriedades físicas, químicas, biológicas e geométricas (Novo, 2007).

Segundo Elachi (1987) as informações registradas por um sensor são de três tipos fundamentais: *informações espaciais*, que permitem identificar a forma do objeto, tamanho, conectividade, entre outras propriedades; informações sobre a intensidade de energia que é refletida ou emitida pelos objetos, e que permitem quantificar a temperatura (sensores termais), o brilho (sensores da região óptica do espectro); informações espectrais, que permitem registrar a variação da intensidade da radiação que deixa a superfície ao longo do espectro eletromagnético. A figura 1 ilustra esse conceito.

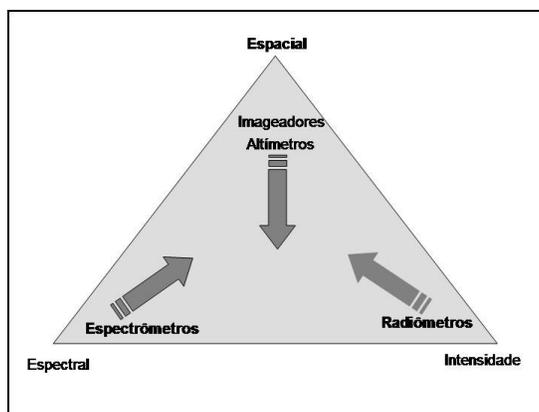


Figura 1– Informações geradas pelos sensores (Adaptado de Elachi, 1987).

A partir dessas três informações básicas são derivadas as propriedades geofísicas e geométricas dos objetos da superfície. Um exemplo desse processo de transformação de informações registradas pelos sensores em informações geométricas é ilustrado pelo RADAR Altimetro. O altímetro envia pulsos de microondas em direção a superfície. O lapso de tempo entre o envio do pulso e o seu retorno é medido e utilizado para calcular a distância entre a plataforma (conhecida pela altura de vôo ou altura da órbita do satélite), uma vez que a velocidade de propagação do pulso é também conhecida (velocidade da luz).

A Figura 2 representa um exemplo de como as informações espectrais, espaciais e de intensidade permitiram mapear a distribuição espacial da concentração da clorofila em suspensão na água até à profundidade Secchi. Todo o processo se inicia com o conhecimento das propriedades ópticas inerentes da água, missões de campo para caracterizar os componentes opticamente ativos e sua relação com as medidas de reflectância, desenvolvendo modelos empíricos e semi-analíticos os quais são aplicados a imagens corrigidas para os efeitos atmosféricos (Rudorff, et al. 2007; Kampel e Novo, 2005). Um aspecto importante a ser ressaltado é que a grandeza medida pelos sensores, é a radiação que deixa o corpo d'água após interagir com diferentes componentes da coluna d'água emerge da superfície. Estudos realizados por vários autores (Mobley, 1994) indicam que cerca de 90 % da energia proveniente da coluna d'água se limita à profundidade do disco de Secchi. Sendo assim, os sensores remotos monitoram apenas a camada mais superficial da coluna de água. Existem modelos, entretanto, que podem posteriormente relacionar as propriedades da superfície com as da coluna d'água.

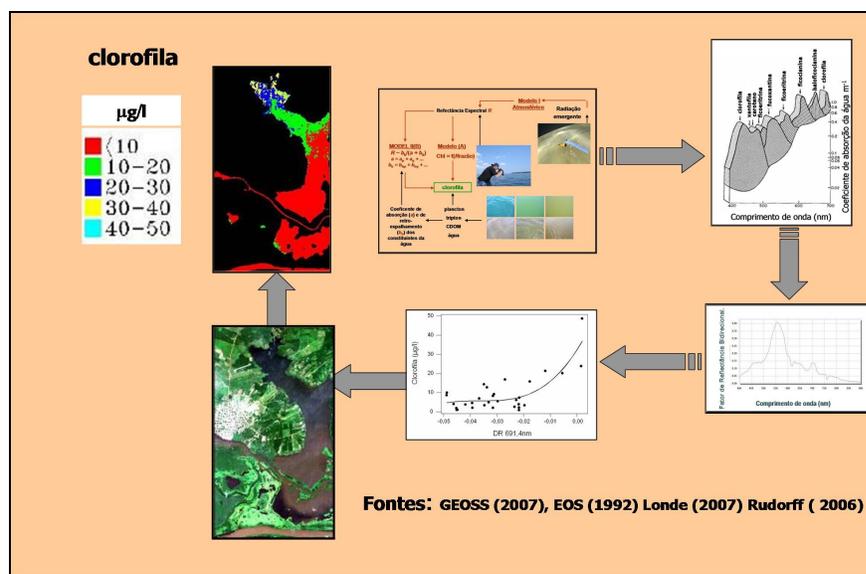


Figura 2 – Processo de conversão de informações espaciais, espectrais e de intensidade de radiação eletromagnética em medidas de propriedades dos corpos de água.

Independentemente do tipo sensor, ele apresenta características básicas que se relacionam ao tipo de informação que registram. Essas características são a *resolução espacial, espectral e radiométrica*. A resolução *espacial* do sensor expressa numericamente a menor feição passível de detecção por um dado instrumento. Com um sensor, cuja resolução espacial é 30 m, não é possível obter informações cujas dimensões são da ordem de trinta metros. Muitas vezes ele pode ser até detectado, dependendo do contraste que apresenta em relação à vizinhança, mas o grau de incerteza sobre as propriedades da superfície que representa é muito grande. A resolução *espectral* expressa a largura das faixas de sensibilidade de cada banda do sensor. As antigas fotografias pancromáticas não tinham resolução espectral, pois os sistemas fotográficos eram equipados com um detector fotoquímico, o filme pancromático que era sensível a toda a radiação visível indiscriminadamente. Com a evolução tecnológica, desenvolveram-se sistemas que permitiram separar a energia do espectro visível e infra-vermelho em várias regiões o que deu origem às imagens multi-espectrais. As primeiras imagens multi-espectrais tinham bandas largas, ou seja, baixa resolução espectral, com capacidade para discriminar quatro ou cinco regiões espectrais. Na tabela 2 pode acompanhar o avanço dos sistemas sensores, na direção dos atuais sistemas hiper-espectrais, que permitem dividir o espectro em mais de 200 regiões ou bandas.

Tabela 2 – Evolução da resolução espectral dos sensores (Adaptada de Novo, 2007).

NOME	Região Espectral (nm)	Número de Bandas	Resolução espectral (nm)	Origem	Início de operação
MSS/Landsat	0,4-1,1	4	100	NASA, USA	1972
TM/Landsat	0,42-2,48; 8-10	7	45 a 200	NASA, USA	1984
Hyperion	0,40-2,50	220	10	TRW Inc, USA	2000

A resolução *radiométrica* de um sensor descreve sua habilidade de distinguir variações no nível de energia refletida, emitida ou retro-espalhada que deixa a superfície do alvo. Esta energia apresenta diferenças de intensidade contínuas, as quais precisam ser detectadas, registradas e reproduzidas pelo sensor. Os primeiros sensores podiam registrar cerca de 64 níveis de variação do sinal que chegava da superfície terrestre. Os atuais sensores possuem configurações que permitem distinguir até 65 536 diferentes intensidades de sinal emitido pela superfície. A partir do momento em que os sensores puderam ser colocados à bordo de satélites, eles ganharam duas características adicionais, que é largura da faixa de imageamento e a frequência de revisita real, que resulta da combinação das características ópticas do sensor e das características órbita do satélite. Essas

características são importantes por vários motivos: a largura da faixa imageada informa sobre a região que pode ser imageada por uma única cena adquirida instantaneamente; a frequência de revisita real (ou resolução temporal real) informa com que frequência uma dada região da superfície é observada. Alguns sistemas possuem uma frequência de revisita total maior do que a revisita real, porque possuem sistemas de apontamento, que permitem direcionar o sensor para registra informações de órbitas adjacentes. A qualidade radiométrica e espacial dos dados fica comprometida, porque a observação é feita segundo ângulos oblíquos, mas é uma opção útil para aplicações que visem programas de avaliação de desastres ou em sistemas de alerta. Para um contato mais profundo com a teoria e tecnologia de sensoriamento remoto recomenda-se a leitura de Slater, 1980; Slater et al., 1983; Simonett e Davis, 1983; Ulaby et al, 1986; Mather, 1987; Curlander e McDonough, 1991; Richards, 1993; Cracknell e Hayes, 1993; Kirk, 1993; Mobley, 1994; Schowengerdt, 1997; Doxaran et al.; 2002; Barnsley et al. 2004.

2 – SENSORIAMENTO REMOTO E A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.

Nesse tópico procurar-se a fazer um balanço da capacidade atual dos sensores orbitais de fornecer parâmetros ambientais relevantes para o monitoramento da qualidade dos recursos hídricos e avaliar os avanços esperados para a próxima década.

A qualidade e quantidade de água disponível para o desenvolvimento econômico é objeto de preocupação de políticos, de agencias ambientais, e do público em geral porque os recursos hídricos têm um valor estratégico para o desenvolvimento econômico e social das nações, para a sustentação da biodiversidade, e para a saúde humana.

Durante a última década houve um aumento do número de sistemas de observação da terra com novos sistemas sensores. Apesar desse grande número de sistemas, ainda existe uma lacuna entre os usuários operacionais, ou seja, aqueles que precisam de uma informação e os especialistas responsáveis pela recepção, processamento e extração de informações. Essa lacuna de conhecimento existe por que de um lado estão os cientistas e engenheiros que sabem como medir variáveis a partir de sensores orbitais, mas tem pouca ou nenhuma idéia das necessidades dos usuários operacionais e do outro lado estão os usuários operacionais (consumidores de informação) com suas necessidades específicas, e que expressam seus requisitos de diferentes modos, usando a nomenclatura de suas disciplinas específicas, com pouco, senão nenhum conhecimento do tipo de informação que pode ser derivada de sensores orbitais.

Como o tema é monitoramento da quantidade e qualidade de água, o primeiro passo, é deixar claro que o conceito de monitoramento não se confunde com estudo ou diagnóstico

Monitoramento é a observação repetitiva de uma área ou fenômeno com uma frequência definida pela variabilidade do fenômeno e pelas necessidades de informação sobre a dinâmica do seu comportamento. Para a previsão do tempo, por exemplo, o monitoramento precisa ter uma frequência horária, por que os fenômenos climáticos operam em altas frequências. Para a previsão e monitoramento de safras, os dados não precisam ser horários, porque a frequência de alteração do fenômeno é mais baixa. A tabela 3 resume alguns aspectos que devem ser considerados na avaliação da tecnologia para o monitoramento dos recursos hídricos.

De modo a preparar-se para os desafios do século 21 no que toca às aplicações de sensoriamento remoto para a gestão de recursos hídricos, identificado como um dos principais fatores de tensão social nesse presente milênio, o Centre for Earth Observation (CEO) da Comissão Européia contratou vários cientistas para responder à seguinte questão: Qual a capacidade presente e futura dos métodos de sensoriamento remoto para estimar parâmetros para monitoramento da água. Vários especialistas se debruçaram sobre a literatura, entrevistas de operadores de sistemas de gestão de recurso hídricos e produziram resultado muito interessante cujo resumo encontra-se nas tabelas que serão apresentadas oportunamente. Para compreender a tabela, existe uma chave explicativa resumida na Tabela 4.

Tabela 3 – Aspectos relevantes à análise do potencial da tecnologia de sensoriamento remoto para o monitoramento da quantidade e qualidade de água (Fonte: Durand et al. , 1999; GEOSS, 2007)

Ciclo de observação	Intervalo requerido entre duas coberturas globais da terra.
Resolução horizontal	Distancia media de amostragem do parâmetro físico
Assunto de interesse	Problema a ser estudado – eutrofização, florações, assoreamento, derrames de óleo, mortandade de peixes, inundação, demanda de água para a irrigação, etc.
Técnica	Dados de sensoriamento remoto incluindo todos os elementos da plataforma, sensores, algoritmos e dados auxiliares.
Algoritmos	Processo pelo qual a informação é derivada dos.
Resolução temporal	Intervalo entre duas medidas sobre uma mesma superfície.
Parâmetros de qualidade e quantidade de água	Qualquer parâmetro geofísico que forneça informações físicas, químicas, biológicas, ecológicas, sanitárias, geológicas ou hidrológicas de um corpo de água.

Tabela 4 – Legenda das tabelas subseqüentes conforme relatório de Durand et al. 1999.

Capacidade para gerar a informação requerida	Explicação das condições de contorno para que essa capacidade seja operacionalizada
Sim	Existem algoritmos para determinar o parâmetro
Parcialmente	Existem algoritmos para determinar apenas um sub-conjunto de parâmetros ou indicadores.
Esperado	Não existe no momento, mas tem potencial teórico e estudos que demonstram viabilidade para ser desenvolvido.
Não esperado	No atual nível de conhecimento, não existe potencial para que essa tecnologia seja usada.
DIN	Não é possível quantificar o parâmetro, mas é possível mapear sua distribuição espacial.

Para facilitar a análise, os parâmetros de interesse foram divididos em categorias: parâmetros físicos, químicos, biológicos, ecológicos, dinâmicos. A tabela 5 resume os parâmetros monitorados por métodos convencionais, e a capacidade presente e futura dos dados de sensoriamento remoto para produzirem essa informação de modo operacional.

Tabela 5 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir operacionalmente parâmetros físicos da água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros físicos	Método convencional de medida	Capacidade de Sensoriamento Remoto	
		sim	sim
Temperatura da água	Radiometria in situ	sim	sim
Condutividade	Radiometria de reflexão	não	esperado
Densidade	Calculada a partir da temperatura e salinidade	não*	esperado
Radioatividade	Cintilometria, contador GM	não	din
Turbidez	Disco de Secch Turbidímetro	sim	sim
Cor	Filtração, e determinação da absorção espectral em 254 nm	sim	sim
Profundidade da zona eufótica	Perfis de irradiância em subsuperfície	sim	sim

* - águas oceânicas sim desde o lançamento do programa Topex/Poseidon

A análise da tabela 5 mostra que dos sete parâmetros de interesse, o sensoriamento remoto tem condições de monitorar quatro. Como era de se esperar até pela própria natureza da informação básica gerada por um sensor remoto, o número de parâmetros químicos passíveis de determinação futura é bem pequeno (tabela 6), a menos que haja alguma nova descoberta. Em alguns casos, como indica a sigla “tbc”, o conhecimento atual é insuficiente para dizer se é viável ou não sua aplicação. O monitoramento de derrames de óleo, entretanto, é uma aplicação importante.

À semelhança dos parâmetros químicos, os parâmetros biológicos também são determinados de forma limitada pela presente tecnologia (tabela 7). Embora os autores indiquem não ser possível a determinação de células fitoplanctônicas, experimentos recentes realizados por Londe (2007) indicam que a primeira derivada da reflectância espectral na região do infra-vermelho próximo permite estimar a densidade de células (células/L).

Alguns parâmetros ecológicos (tabela 8) também são passíveis de determinação atualmente e outros mais, têm grande potencial de desenvolvimento no futuro, como é o caso da determinação da biodiversidade fitoplanctônica, com o advento dos sensores hiperespectrais, que possuem bandas localizadas em posições específicas dos pigmentos que caracterizam os diferentes grupos de algas e do bacterioplankton (Weaver e Wrigley, 1994). A tecnologia de sensoriamento remoto também permite determinar alguns parâmetros dinâmicos (tabela 9) e geométricos (tabela 10), sendo, entretanto, totalmente inadequada para a determinação direta dos chamados parâmetros sanitários (tabela 11).

A análise das tabelas mostra que existem pelo menos 14 parâmetros de qualidade de água são passíveis de monitoramento vias sensoriamento remotas. Porque então essa informação não é integrada aos sistemas de manejo? Algumas das razões dizem respeito à frequência de obtenção de medida, da resolução espacial em que ela é necessária e da velocidade de disponibilidade dos dados para uso efetivo pelo gestor. Os gestores de qualidade e quantidade têm interesse que os dados estejam disponíveis pelo menos duas vezes por mês, com uma resolução espacial mais fina que 300m x 300 m, característica não apresentada por nenhum dos sensores atualmente disponíveis. Além disso, os requisitos de precisão das medidas são também altos. O monitoramento da concentração de clorofila, por exemplo, deve ser feita no range de 1 a 300 mg/l com um erro de 10 %, enquanto que os modelos disponíveis têm margens de erro bem maior, principalmente porque são desenvolvidos a partir de sensores não específicos para a avaliação da qualidade da água.

Apesar dessas limitações, existem numerosos exemplos em que os dados de sensoriamento remoto são usados de forma operacional para o monitoramento da qualidade e quantidade de água. No próximo tópico, portanto, serão apresentados alguns exemplos de aplicação. Os exemplos selecionados procuram exemplificar as aplicações mais diversas, incluindo a extração de informações de propriedades físicas, químicas, biológicas, ecológicas, geométricas, dinâmicas,

usando seja usando sensores já operacionais, como sensores ainda operando como cargas úteis experimentais.

Tabela 6 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir de modo operacional parâmetros químicos da água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros químicos	Método convencional de medida	Capacidade de Sensoriamento Remoto	Parâmetros químicos
Salinidade	Salinômetro	não	esperado
Fósforo total	Digestão, mineralização, fotometria.	não	esperado
Nitrogênio Total		não	esperado
Carbono orgânico dissolvido	Oxidação catalítica Espectroscopia de infravermelho	parcialmente matéria orgânica dissolvida	esperado
Carbono total	Oxidação catalítica Espectroscopia de infravermelho	não	esperado
Sílica Total	AAS, SM	não	não
Alcalinidade	Titration	não	tbc
pH		não	não
Demanda química de oxigênio	Dicromático, permanganato, Kubel	não	não
Oxigênio dissolvido	Método de Winkler	não	não
Anoxia	Método de Winkler	parcialmente	parcialmente
Composição iônica	EA, ISE	não	não
Compostos sulfurosos	cromatografia	não	não
mineralização		não	não
Pesticidas	Extração, HPCL	não	não
Metais pesados	Ativação de neutron	não	din
Óleos		sim	sim
Tipos de óleos	Extração	não	esperada
Hidrocarbonetos e clorados	Extração	não	não

Tabela 7 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir operacionalmente parâmetros biológicos da água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros Biológicos	Método convencional de medida	Capacidade de Sensoriamento Remoto	Parâmetro biológico
Pigmentos clorofilados	HPLC, Extração e espectrofotometria	sim	sim
Pigmentos acessórios	HPLC, Extração e espectrofotometria	sim	sim
feopigmentos	espectroscopia	não	tbc
Demanda bioquímica de oxigênio	Método da diluição	não	não
Contagem de células fitoplanctônicas	microscópio	não	tbc
Biomassa fitoplanctônica	FILTRAGEM E PESAGEM	não	esperada
Contagem de fungos	microscopia	não	não
bacterioplancton contagem	microscópio	não	Não esperada
bacterioplancton biomassa	modelos	não	Não esperada
zooplankton: contagem	microscópio	não	não
zooplankton: biomassa	calculo	não	tbc
detritos concentração	Sem especificação	sim	sim

Tabela 8 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir operacioanalmente parâmetros ecológicos da água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros Ecológicos	Metodos convencionais	Sensoriamento Remoto	
		Presente	Futuro/Potnecial
Produção primária líquida	Garrafas de incubação	Sim	sim
Estado trófico da água	Indices de estado trofico	não	esperado
Decomposicao bacteriana	-	não	não
Grazing do fitoplancton	-	não	não
Biodiversidade fitoplanctonica	microscopio	parcialmente	esperada
bacterioplancton	microscopio	não	tbc
zooplancton	microscopio	não	não
fungos	microscopio	não	não
Estado da biota litoral pelagica bentos macrofita	-	Não sim Não Sim	sim esperada esperada sim

Tabela 9 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir de modo operacional parâmetros dinâmicos da água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros dinâmicos	Metodos convencionais	Sensoriamento Remoto	
		Presente	Futuro/ potencial
Sedimentos em suspensão	gravimétrico	sim	sim
Nível da água	Regua, linigrafo	sim	sim
Tempo de residencia	calculos	nao	tbc
fluxo	ADCP	nao	tbc
Estratificação de lagos	-	nao	nao
Correntes e ondas	correntômetro	sim	sim

Tabela 10 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir de modo operacional parâmetros geométricos do corpo d’água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros geométricos	Métodos Convencionais	Sensoriamento remoto	
		Presente	Futuro/Potencial
Área do corpo d’água	Mapeamento	sim	sim
Morfometria	Topografia/geomorfolo- gia	sim	sim
Batimetria	Ecobatimetro	nao	nao
Volume de agua	Modelos	nao	tbc

Tabela 11 – Capacidade de sensoriamento remoto para medir de modo operacional parâmetros sanitários do corpo d’água (Adaptado de Durand et al, 1999).

Parâmetros sanitários	Métodos convencionais	Sensoriamento Remoto	
		Presente	Futuro/Potencial
Cheiro	-	não	não
Gosto	-	não	não
Salobridade	-	não	não
Toxicidade	-	não	não
Formas fecais	Endo-agar 43C, contagem em 24 (colônias vermelhas)	não	não
Salmonella	-	não	não

3–EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO GESTÃO RECURSOS HÍDRICOS.

Imagens hiperespectrais coletadas pelo sensor Hyperion, a bordo do satélite Earth Observing One, foram utilizadas por Rudorff (2006) para o mapeamento e caracterização espectral de massas de água de diferentes composições que ocorrem na planície de inundação Amazônica. O Hyperion foi o primeiro sensor orbital hiperspectral, sendo transportado a bordo do satélite *Earth Observing One* (EO-1) em uma órbita de 705 km de altitude. Os sensores hiperespectrais apresentam diversas possibilidades para interpretação e análise por fornecerem medidas em bandas estreitas e contínuas ou espectros de pixel com resolução espectral mais próxima da existente em condições de laboratório. A partir do teste de vários procedimentos, o autor concluiu que os melhores modelos baseavam-se nas derivadas da reflectância em 711,7nm e em 691nm para estimar a distribuição espacial da concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão e de clorofila-a, respectivamente.

A Figura 3 mostra o mapa com a distribuição superficial do Total de Sólidos Suspensos e da Concentração Superficial da Clorofila.

A análise da figura permite verificar que na região de concentrações de TSS inferiores a 5 mg/l, ocorrem maiores concentrações de clorofila, provavelmente porque a partir de maiores valores ocorrem sérias limitações de luz. Esse tipo de aplicação só é possível porque o sensor hiperspectral possui uma banda em 691 nm sensível ao efeito da fluorescência da clorofila em 683 nm (Kirk, 1995), cujo sinal é percebido e se contrapõe ao aumento do coeficiente de absorção pela água.

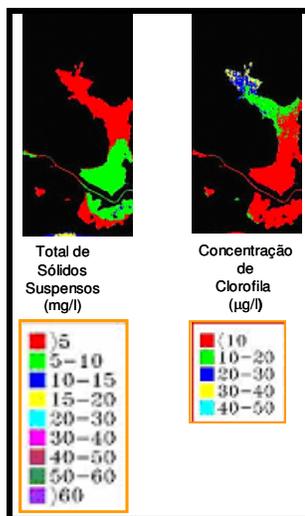


Figura 3 – Distribuição do Total de Sólidos Suspensos e de Clorofila derivada de imagens do sensor Hyperion (Fonte: Rudorff, 2006).

A principal limitação de um sistema como o Hyperion é a largura da faixa que pode recobrir a cada órbita (7,5 km), o que o torna inadequado para o estudo de grandes corpos d' água, não apenas pelo recobrimento limitado da superfície, mas também pela frequência de recobrimento. O resultado desses estudos pode, entretanto, ser utilizado para definir regiões espectrais mais adequadas para a discriminação de componentes da água permitindo a construção de sistemas de sensoriamento remoto orientados para a detecção do parâmetro de interesse.

O sistema MODIS/Terra, por exemplo, está sendo investigado para a implementação de um sistema de alerta da qualidade da água de reservatórios do sul e sudeste do Brasil, onde o uso intenso dos recursos das bacias hidrográficas tem trazido crescentes problemas não apenas no tocante à quantidade de água, mas à qualidade.

Na Figura 4, podem-se observar duas cenas do sensor MODIS (4a e 4b) adquiridas com um intervalo de uma semana, uma vez que a largura de faixa imageada por ele proporciona uma frequência de recobrimento dessa região a cada 2 dias. Apesar da cobertura de nuvens, é possível obter informações de grande parte do Estado de São Paulo, leste do Estado de Mato Grosso do Sul, e Sudoeste de Minas Gerais. Embora o sensor MODIS (Novo et al. 2007) tenha uma resolução

espacial média (250 m x 250 m) nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, e (500 m x 500m) na banda sensível a radiação verde, suas imagens permitem identificar mudanças na cor da água que podem ser associadas a mudanças em sua qualidade.

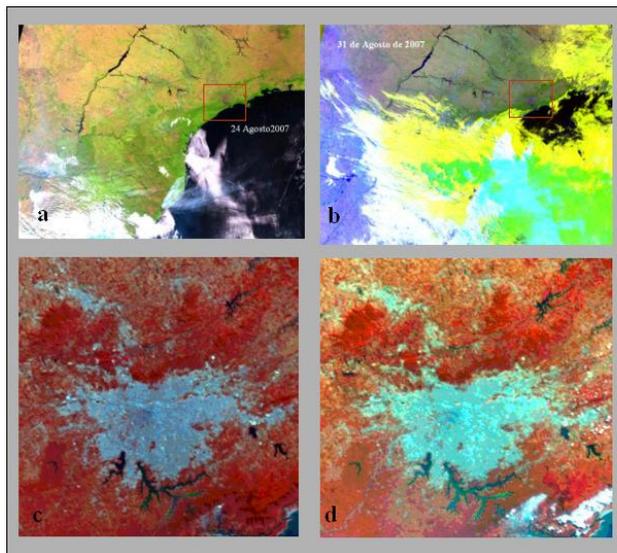


Figura 4 – Proposta de um sistema de alerta do estado da água com base em imagens MODIS/Terra (NASA, 1990). 4a- composição R(infravermelho de ondas longas) G (infravermelho próximo) B (vermelho) da imagem adquirida em 24 de agosto de 2007, 4b – composição semelhante adquirida em 31 de agosto de 2007. ; 4c – composição R(infravermelho próximo), G(verde), B(vermelho) da região metropolitana de São Paulo e seus reservatórios, referente a 24 de agosto de 2007; 4d. composição semelhante, referente a 31 de agosto de 2007.

Nessa composição, a cor da água é realçada, pois nas regiões de cobertura vegetal densa com alta reflexão na região do infravermelho, a imagem apresenta cores em tonalidades vermelhas. Os corpos de água com baixa turbidez tendem a aparecer escuros enquanto os corpos de água com florações de alta densidade de fitoplâncton à superfície, tendem a apresentar cor verde. Comparando-se as duas cenas, percebe-se uma mudança de cor da água na represa Billings, mudança essa que parece sugerir deterioração da qualidade da água, provavelmente ligada a processos de desestratificação da coluna de água e disponibilização de nutrientes do fundo. É claro, que a variação das cores, é apenas um alerta, o qual deverá ser verificado pelas equipes de campo. A existência de alertas desse tipo, entretanto, podem introduzir inteligência ao processo de gestão da água, economizando recursos de verificação mais intensa no campo.

Os dados de sensoriamento remoto também tem sido usados como entrada para modelos para o mapeamento dos componentes do balanço de energia (saldo de radiação, densidade de fluxo de calor sensível, latente e para o solo). Folhes et al (2007) utilizaram dados do sensor TM/Landsat-5 para modelar esses fluxos havendo grande concordância entre os valores medidos em estações micro-meteorológicas e os estimados a partir de parâmetros extraídos das imagens.

Existem muitos outros sistemas experimentais que podem ajudar no monitoramento da quantidade e qualidade de água tais como os relatados por Hamilton et al. (2002) que desenvolveu um modelo para a estimativa de área sujeita a alagamento em grandes bacias hidrográficas a partir da análise de séries temporais de radiômetros de microondas, usando a diferença de temperatura de canais com polarização cruzada como indicador de diferença de umidade. Outros exemplos são fornecidos por Alsdorf et al. (2003) usando métodos interferométricos aplicados a imagens de radar de abertura sintética.

4– DIAGNÓSTICO E PERSPECTIVAS FUTURAS.

O uso da tecnologia de sensoriamento remoto no monitoramento e gestão de recursos hídricos ainda é bastante limitado. Essas limitações decorrem de vários fatores: 1) ligados ao estágio de maturação da tecnologia para estudos de sistemas aquáticos continentais. Grande parte dos sistemas de sensoriamento remoto disponíveis é voltada a aplicações terrestres (mapeamento geológico, manejo de recursos florestais), oceanográficas (ventos, circulação oceânica, produtividade primária dos oceanos) e meteorológicas; 2) ligados à capacitação de recursos humanos para o uso da tecnologia; 3) ligados ao desconhecimento dos limites e da ciência sobre o qual repousam as aplicações.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece à FAPESP, CNPq, CAPES e INPE pelo suporte às pesquisas relatadas.

BIBLIOGRAFIA

ALSDORF, D.E., MELACK, J. M., DUNNE, T, MERTES, L.A.K.;HESS, L.L. ; SMITH, L.C.

Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon floodplain, *Nature*, 404, 174-177, 2000.

BARNSLEY, M. J.; SETTEL, J.J.; CUTTER, M.A.; LOBB, D. R.; TESTON, F. The PROBA/CHRIS Mission: A Low-Cost Smallsat for Hyperspectral Multiangle Observations of the Earth Surface and Atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42 (7):2004

BATTRICK, B. *Global Earth Observation System of Systems* ESA SP-1284, Holanda, ESA Publications Division, 2005, p.210.

BEILFUSS, R.D.; BARZEN, J.A. Hydrological wetland restoration in the Mekong Delta, Vietnam.

In: Mitsch, W.J. Ed. *Global Wetlands: Old World and New*. Elsevier Science, 1994. p.453-468.

CORDEIRO, M. C.R. The Hydrological Monitoring Network Services and Gaps **Workshop on Capacity Building**. *Group on Earth Observations*. São José dos Campos, INPE, 29-31 de Maio, 2006.

- CRACKNELL, A. P.; HAYES, L. W. B. *Introduction to remote sensing*. London: Taylor e Francis, 1993. 293p.
- CURLANDER, J.C.; MCDONOUGH, R.N. *Synthetic aperture radar: systems and signal processing*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1991.
- DOXARAN, D.; FROIDEFOND, J.-M; LAVENDER, S. CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment* 81 (2002) 149– 161
- DURAND, D; SANDVEN, S.; POZDNYAKOV, D.; CAUNEAU, F. ;WALD, L. ; ,MILES, M.; KLOSTER, K.; JACOB, A. Characterisation of Coastal and Inland Waters with Space Sensors NERSC Technical Report No. 164 <http://www.nrsc.no>, 1999
- ELACHI, C. *Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing*. New York. Wiley & Sons. , 1987.p.412.
- FOLHES, M. T.; SOARES, J. V.; RENNÓ, C. D. , CORREIA, A. H. **Estimativa de fluxos de energia por meio do modelo METRIC em região semi-árida** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3349-3356
- GEOSS <http://earthobservations.org/docs/10-Year%20Implementation%20Plan.pdf> , consultado em outubro de 2007.
- HAMILTON,S.K. SIPPEL,S.J.; . MELACK, J.J. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains *Journal of Geophysical Research*, V. 107, 0,10.1029/2000JD000306,2002.
- INPE <http://paraguay.cptec.inpe.br/produto/queimadas/> , 2007c
- INPE <http://www.cptec.inpe.br/tempo/> ,2007b
- INPE <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html> 2007d
- INPE < <http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/>> 2007a.
- KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O Sensoriamento Remoto da cor da água. In: SOUZA, R.B. (Org). *Oceanografia por Satélites*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, cap. 12, p. 179-196.
- KIRK, J.T.O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- LONDE, L. **Comportamento espectral de fitoplâncton de águas interiores do brasil como suporte à aplicação de sensores hiperespectrais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. Tese de Doutorado, Divisão de Sensoriamento Remoto, em fase de conclusão.
- MATHER, P. M. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*.Chichester: John Wiley and Sons, 1987. 352p.

- MOBLEY, C.D. (1994), *Light and Water - Radiative Transfer in Natural Waters*. San Diego: Academic Press Inc, pp. 592.
- NASA. *The Earth Observing System - EOS: a mission to planet Earth*. Washington DC, feb, 1990, p. 36.
- NOVO, E.M.L.M. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. São Paulo, Ed. Blucher, 269 p. 3º ed. (in press).
- REBOUÇAS, A. C. *A água doce no mundo e no Brasil*. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Org.) *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. São Paulo, Escrituras. p. 01-37, 2º edição, 2002.
- RICHARDS, J. A. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 340p.
- RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. Dissertação de Mestrado, Divisão de Sensoriamento Remoto, 2006.
- RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S.; FILHO, W. P. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 37, n.2, p. 279-290, 2007
- SCHOWENGERDT, R.A. *Models and methods for image processing*. 2. ed. 1997,522p.
- SIMONETT, P.S.; DAVIS, R.E. *Image analysis – active microwave*. In: America Society of Photogrammetry (ASP) *Manual of remote sensing: theory, instruments and techniques*. Falls Church, 1983. v.2, p. 1125-1179.
- SLATER, P. N. *Remote sensing. optics and optical systems*. Reading: Addison- Wesley, 1980, p.575
- SLATER, P. N., DOYLE, F.J.; FRITZ, N.L.; WELCH, R. Photographic systems for remote sensing. American Society of Photogrammetry. In: Cowell, R.N. ed. **Manual of remote sensing**, 2.ed. Falls Church: ASP, 1983. v.1, Cap. 6, p. 231-291
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. *Microwave remote sensing: active and passive*. Reading, Addison-Wesley, v. 3, 1986,. p.412.
- WEAVER, E. C.; WRIGLEY, R., 1994, Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing, Moffet Field, California, NASA, p. 124.
- WETZEL, R.G. *Limnology Lake and River Ecosystems*. San Diego. Academic Press, 3º ed., p. 1006.