

# A altimetria por satélite aplicada à hidrologia

---

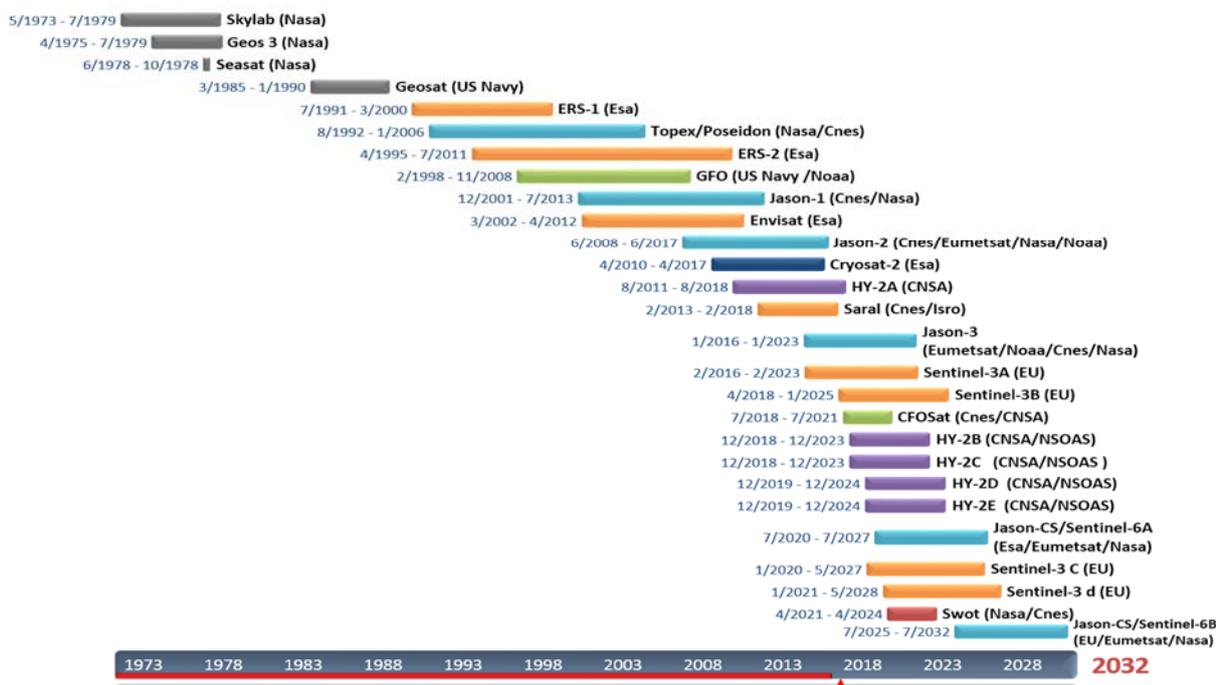


A altimetria radar por satélite foi concebida e desenvolvida na década de 1970 para estudar a variabilidade espaciotemporal do nível dos oceanos. Atualmente, os radares altimétricos medem, na direção nadiral, a distância (range) entre o satélite e a superfície da Terra, a partir da qual se obtém a altitude instantânea da superfície relativamente a um elipsoide de referência, com uma precisão da ordem de alguns centímetros sobre o oceano. Ao contrário dos sistemas de medição passivos, que utilizam a radiação emitida pelo sol ou pela Terra, os radares são sistemas ativos que utilizam uma fonte de radiação própria, facto que oferece múltiplas vantagens: precisão das medidas, capacidade de penetração através da atmosfera, tanto de dia como de noite, etc. Além disso, os comprimentos de onda usados permitem a utilização independentemente das condições meteorológicas (é possível efetuar medições através das nuvens, mediante a correção de determinados efeitos).

A altimetria radar também permite medir a altitude de grandes massas de água continentais e de rios, podendo assim complementar as redes de medições hidrométricas existentes, e em casos específicos substituir estações hidrométricas consideradas pouco fiáveis ou pouco eficazes (por exemplo, por terem prazos de fornecimento da informação muito longos). A altimetria por satélite permite efetuar medições do nível de cursos de água e lagos, relativamente a um referencial único, sem necessitar qualquer intervenção humana no terreno além das atividades de calibração, e com a garantia de cobertura global Por longos períodos de tempo.

### A altimetria no presente: medição da altitude da superfície

Desde o início da década de 1990, realizaram-se continuamente medições espaciais de altimetria radar, com duas séries de satélites sucessivas desde então (a série ERS-1, ERS-2, Envisat, Saral e a série Topex/Poseidon, Jason-1, 2, 3). Durante este período, foram lançados outros satélites (GFO, HY-2A e especialmente Cryosat-2). Ainda antes dessa data foram lançados alguns satélites (Seasat, Geosat), mas cuja utilização não se destina à hidrologia. O Sentinel-3 constitui uma nova série que utiliza uma nova órbita, iniciada em fevereiro de 2016 e destinada à utilização a longo prazo.



Histórico de missões altimétricas

Atualmente, todas as missões altimétricas apenas realizam medições na direção do nadir (verticalmente sob o satélite), proporcionando observações com uma cobertura espacial muito reduzida. Esta é a principal limitação destas missões.

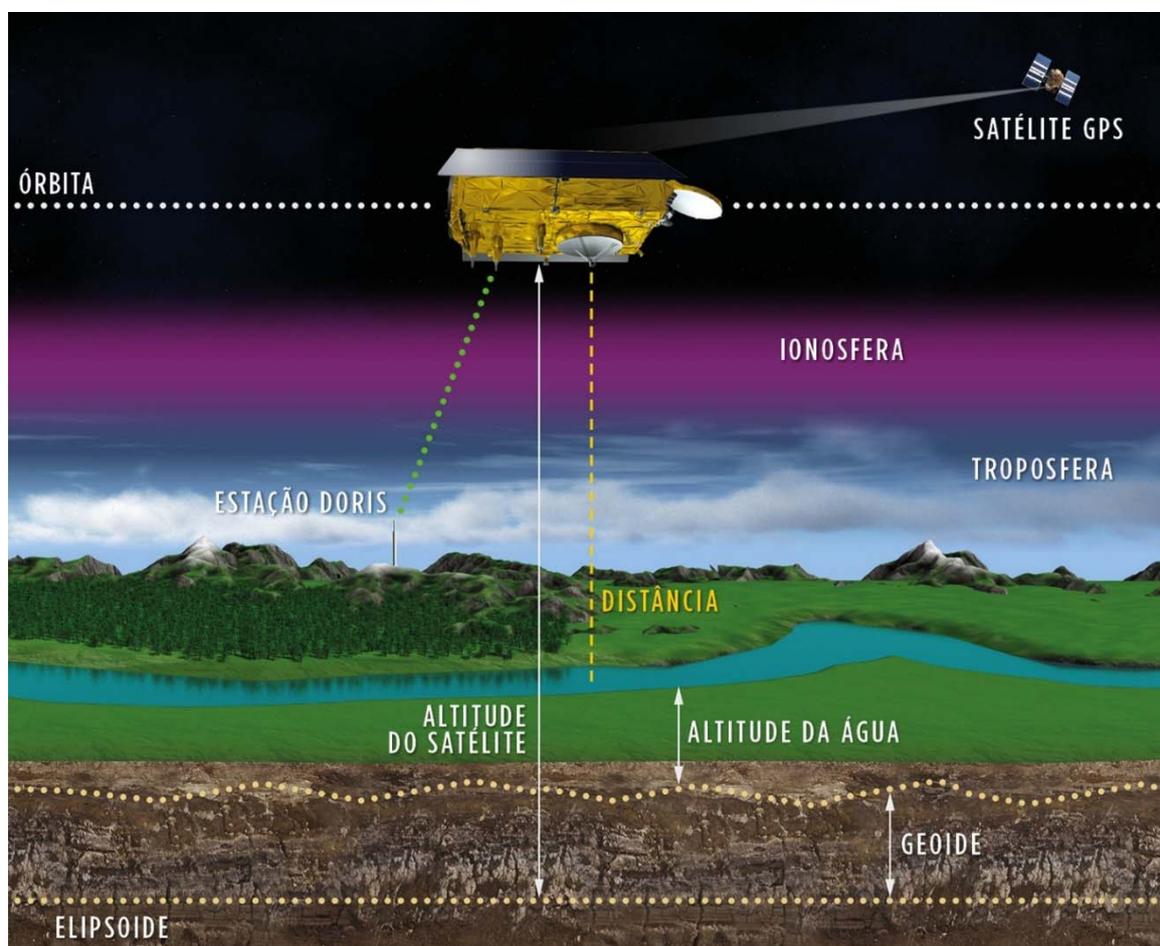
Presentemente, utilizam-se duas técnicas: a altimetria "convencional" nas missões Topex/Poseidon, Jason, Saral ou Envisat, denominada "LRM" (*Low Resolution Mode*, modo de baixa resolução) e a altimetria "SAR" (*Synthetic*

*Aperture Radar*, radar de abertura sintética) também denominada "*Delay-Doppler Altimetry*" (altimetria *Delay Doppler*), que se utiliza no Cryosat-2 e nos Sentinel-3.

O satélite SWOT, cujo lançamento está previsto para 2021, levará a bordo uma nova técnica designada altimetria de varrimento amplo, que permitirá a observação a duas dimensões dos cursos e massas d'água.

Simplificando, estas duas técnicas utilizam uma onda radar emitida pelo satélite, na vertical, em direção à terra, que se reflete na superfície (a água constitui o melhor "espelho", sobretudo quando está calma). Mede-se o tempo que a onda leva para efetuar o trajeto de ida e volta entre o satélite e a superfície; conhecendo-se a velocidade de propagação desta onda (a velocidade da luz), é possível deduzir a distância entre o satélite e a superfície. O princípio é semelhante à reflexão das ondas sonoras. Ao gritar na direção de um objeto capaz de refletir o som da sua voz, como por exemplo num desfiladeiro ou numa gruta, é possível ouvir o respetivo eco. Conhecida a velocidade do som no ar, é possível estimar a distância, tendo em conta o tempo de que o som necessita para efetuar o trajeto de ida e volta (por analogia, nas ondas radar também se utiliza a designação "eco").

Além disso, graças a vários instrumentos a bordo (Doris, GPS, refletor laser), é possível determinar com precisão a altitude e a posição do satélite relativamente a uma referência bem definida. Efetuando a subtração entre esta altitude e o *range* medido, deduz-se a altitude da superfície relativamente a uma referência. Através da passagem sucessiva do satélite pelo mesmo ponto, observam-se as variações da altitude da superfície. A referência utilizada nos dados de base é um elipsoide, ou seja, uma forma geométrica semelhante a uma esfera achatada nos polos, que se assemelha à forma da Terra. No entanto, em hidrologia, utiliza-se mais frequentemente o geóide, uma superfície equipotencial do campo de gravidade terrestre, que se aproxima mais da forma real da Terra, tendo em conta a deformação devida ao relevo. Geralmente, este tipo de superfície é fornecida com os dados de altimetria, no entanto, há outros dados que fornecem esta referência com maior precisão. A utilização deste tipo de referência permite obter a altitude da superfície da água, e consequentemente o seu declive, variável essencial para a hidrologia.



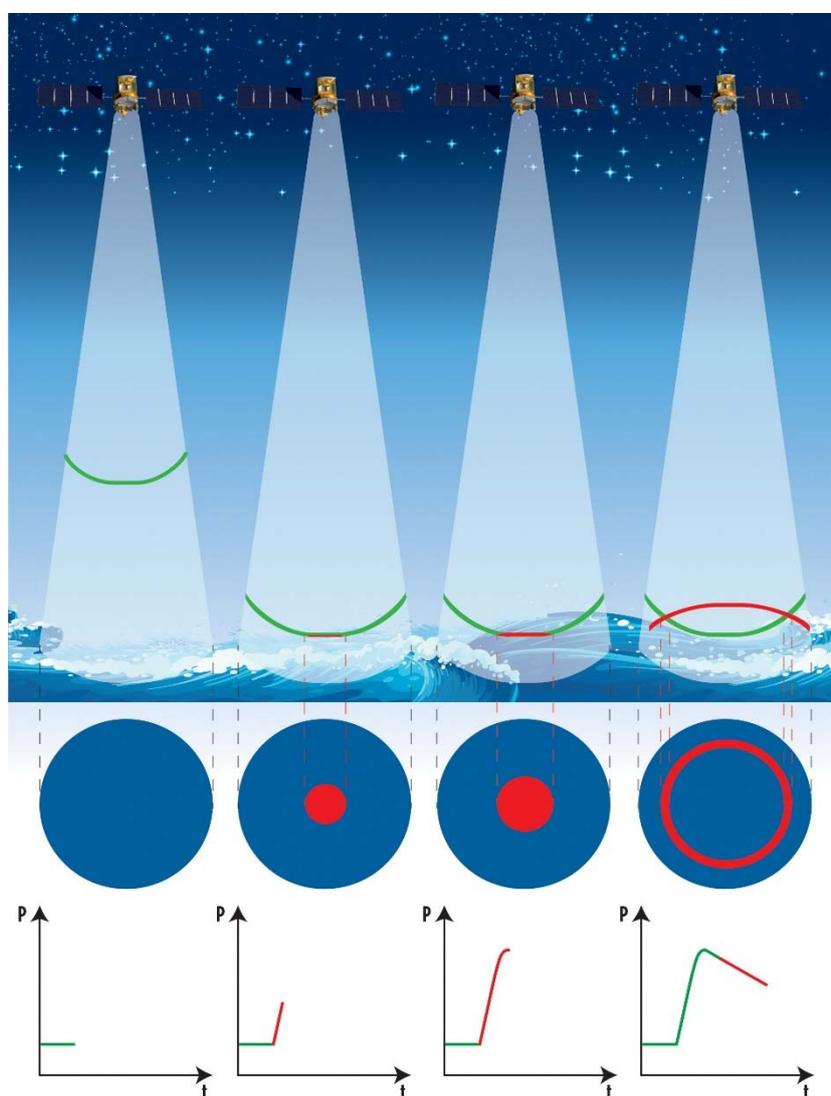
*Princípio da altimetria*

No entanto, este é apenas um esquema simplificado. Por um lado, porque é importante ter em conta um determinado número de fatores que influenciam a velocidade da onda radar, e corrigi-la em conformidade, o que é possível através de modelos (sobretudo modelos meteorológicos), e eventualmente através de medições auxiliares efetuadas por instrumentos a bordo do satélite (ou a bordo de outros satélites) especialmente sobre os oceanos. E, por outro lado, porque não se mede propriamente o tempo de ida e volta do sinal. Com efeito, a superfície refletora raramente é perfeitamente plana, e a onda possui uma extensão ("pegada no solo") e uma duração. Tudo isso faz com que o eco de retorno não seja instantâneo, mas que se estenda ao longo do tempo com uma amplitude variável. Assim, trabalha-se com a forma do eco de radar em função do tempo, que em altimetria se denomina "forma da onda" (*waveform*).

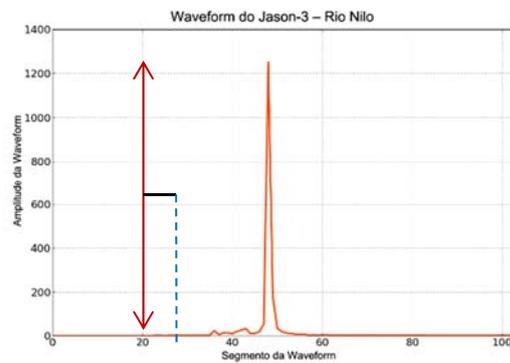
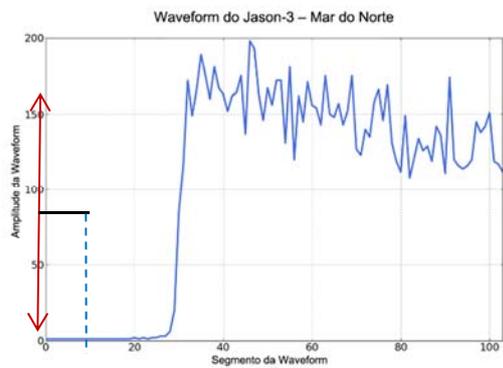
### Os ecos radar na altimetria convencional

Os satélites em causa são: ERS-1 & 2, Topex/Poseidon, GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, Saral, HY-2 e Jason-3 (assim como os respetivos precursores).

A altimetria "convencional" considera a reflexão do feixe emitido como um todo, ou pelo menos, a parte que regressa à antena do satélite.



*Eco de altimetria convencional sobre o oceano. Na parte superior, visualiza-se o esquema do satélite e da onda emitida, bem com a onda refletida a vermelho. No meio, visualiza-se o que acontece na superfície (neste caso, o oceano tem uma superfície plana). Na parte inferior, visualiza-se o eco (ou forma da onda, waveform) recebido pelo altímetro, sendo que a parte vermelha da curva corresponde à etapa esquematizada acima. A parte deste eco que sobe abruptamente é a que se utiliza para determinar a distância (o ponto a meia altura). A área dos anéis vermelhos é idêntica à do círculo; o declive descendente da curva está relacionado com o ganho da antena do altímetro.*



*Eco convencional sobre o oceano (à esquerda), e num rio (à direita). Apenas o primeiro é objeto de uma representação completa sob a forma de uma equação [Brown, 1977]. O segundo, no entanto, permite extrair a informação temporal utilizando (em ambos os casos) o instante correspondente à meia altura da subida brusca da curva observada em ambos os casos.*

Tendo em conta a diversidade de ecos presentes nas superfícies hidrológicas, que podem variar entre um pico único e uma série de picos múltiplos mais ou menos agrupados, foram realizados exercícios de classificação no âmbito de diferentes projetos. A figura abaixo ilustra as classes utilizadas para a classificação dos dados do Jason-2. Algumas classes correspondem a ecos no oceano ou superfícies de água bastante extensas (classe 1, ecos de Brown). Os ecos nos rios tendem a integrar-se na classe 2 ou em classes com mais ruído (que são, por isso, mais difíceis de utilizar, como a classe 23, ou são até inutilizáveis, como a classe 3). Os lagos gelados podem produzir ecos de classe 13.

<p><b>Classe 1</b></p> <p>Ecos de Brown</p>	<p><b>Classe 2</b></p> <p>Ecos de pico</p>	<p><b>Classe 3</b></p> <p>Ecos com muito ruído</p>	<p><b>Classe 4</b></p> <p>Ecos lineares</p>	<p><b>Classe 5</b></p> <p>Ecos de pico no final</p>	<p><b>Classe 6</b></p> <p>Ecos de pico muito grande</p>
<p><b>Classe 12</b></p> <p>Ecos de Brown + pico</p>	<p><b>Classe 23</b></p> <p>Pico + ruído</p>	<p><b>Classe 13</b></p> <p>Brown + perturbação da frente crescente</p>	<p><b>Classe 24</b></p> <p>Brown + pico + variação linear</p>	<p><b>Classe 15</b></p> <p>Brown + frente crescente prolongada</p>	<p><b>Classe 0</b></p> <p>CS32</p>
<p><b>Classe 21</b></p> <p>Ecos de Brown + pico</p>	<p><b>Classe 35</b></p> <p>Frente crescente no final + ruído</p>	<p><b>Classe 16</b></p> <p>Brown + rampa com descida acentuada</p>	<p><b>Classe 99</b></p> <p>??</p> <p>Dúvida</p>		

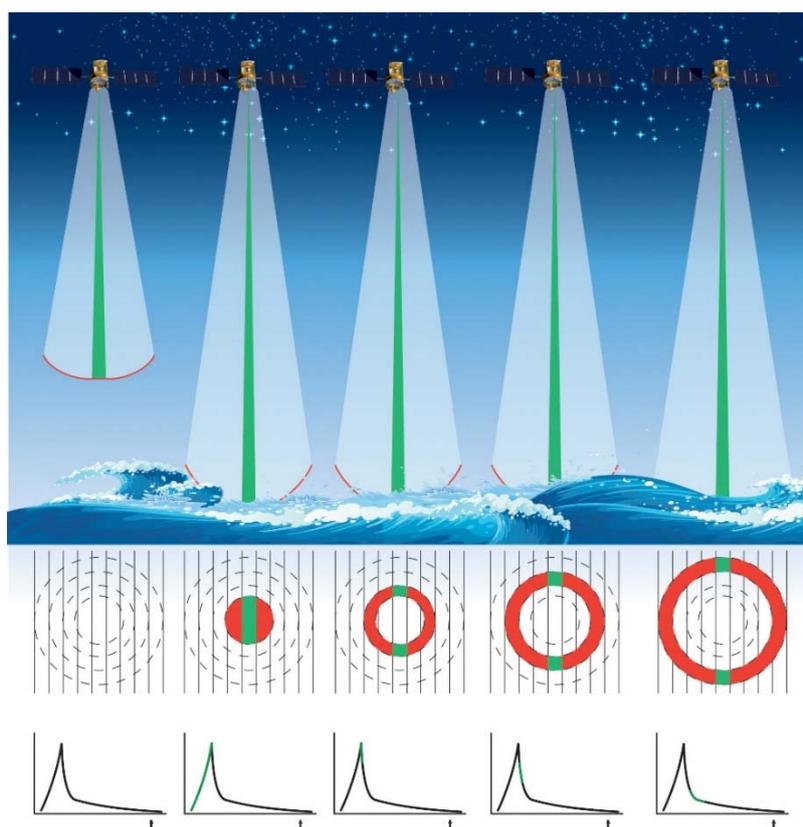
*Diferentes formas de eco (classes de formas da onda ou waveform, altimetria convencional); a classe 2 é a que tipicamente se encontra num curso de água simples, a classe 1 ("Brown") é a forma clássica sobre o oceano.*

## Os ecos de radar na altimetria SAR ou *Delay Doppler*

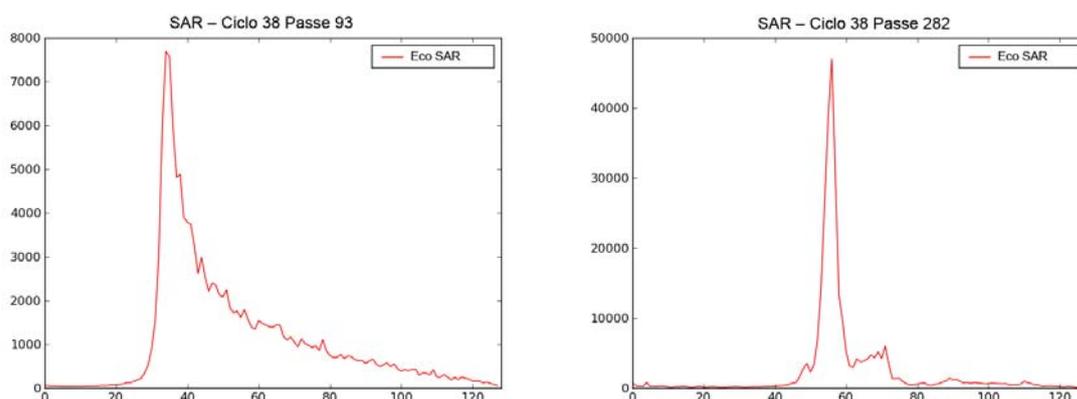
Os satélites que se encaixam nesta categoria são: Cryosat-2, Sentinel-3 (A e B), e no futuro Sentinel-3 (C e D) e Jason-CS/Sentinel-6.

O som emitido por um objeto em movimento parece mais ou menos agudo, função da velocidade segundo a qual ele se aproxima, e mais ou menos grave, função da velocidade segundo a qual ele se afasta. Este fenómeno denomina-se efeito Doppler (ou efeito Doppler-Fizeau, quando se fala em radiação eletromagnética).

A altimetria SAR utiliza este efeito Doppler para distinguir as reflexões provenientes da parte de trás ou da frente do feixe emitido: se provierem da parte de trás, é como se o satélite se afastasse, se provierem da parte da frente, é como se o satélite se aproximasse. Obtêm-se uma espécie de "fatias" da pegada convencional, perpendiculares à trajetória do satélite. Consequentemente, obtém-se uma resolução espacial superior, pelo menos na direção do movimento do satélite.



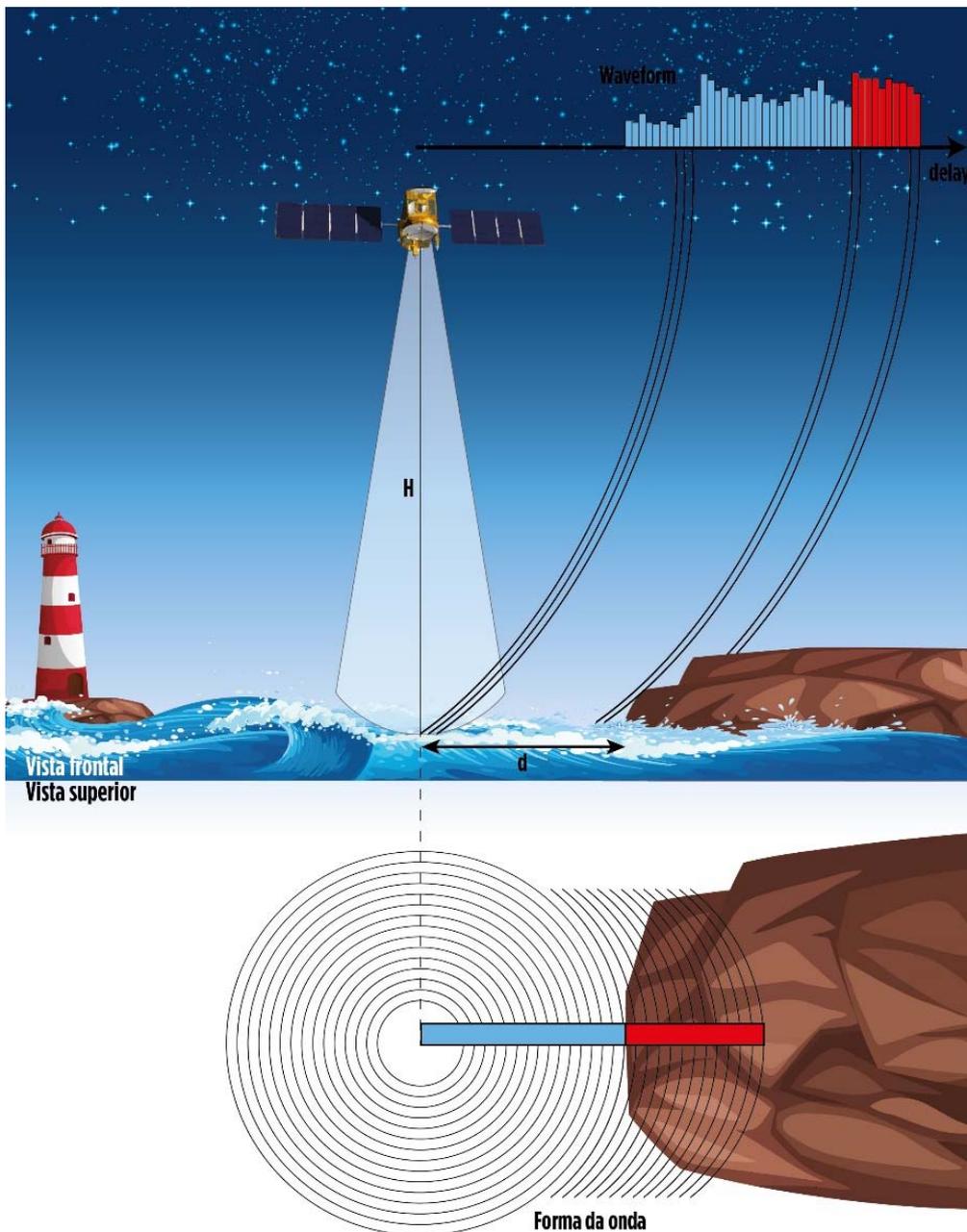
*Formação de um eco por altimetria Doppler (sobre o oceano); onde a altimetria convencional mostrava uma quase planície após a subida (porque a superfície de todos os anéis representados é igual), o eco na altimetria Doppler diminui. (Créditos: CNES/CLS, a partir de uma apresentação de K. Rayney)*



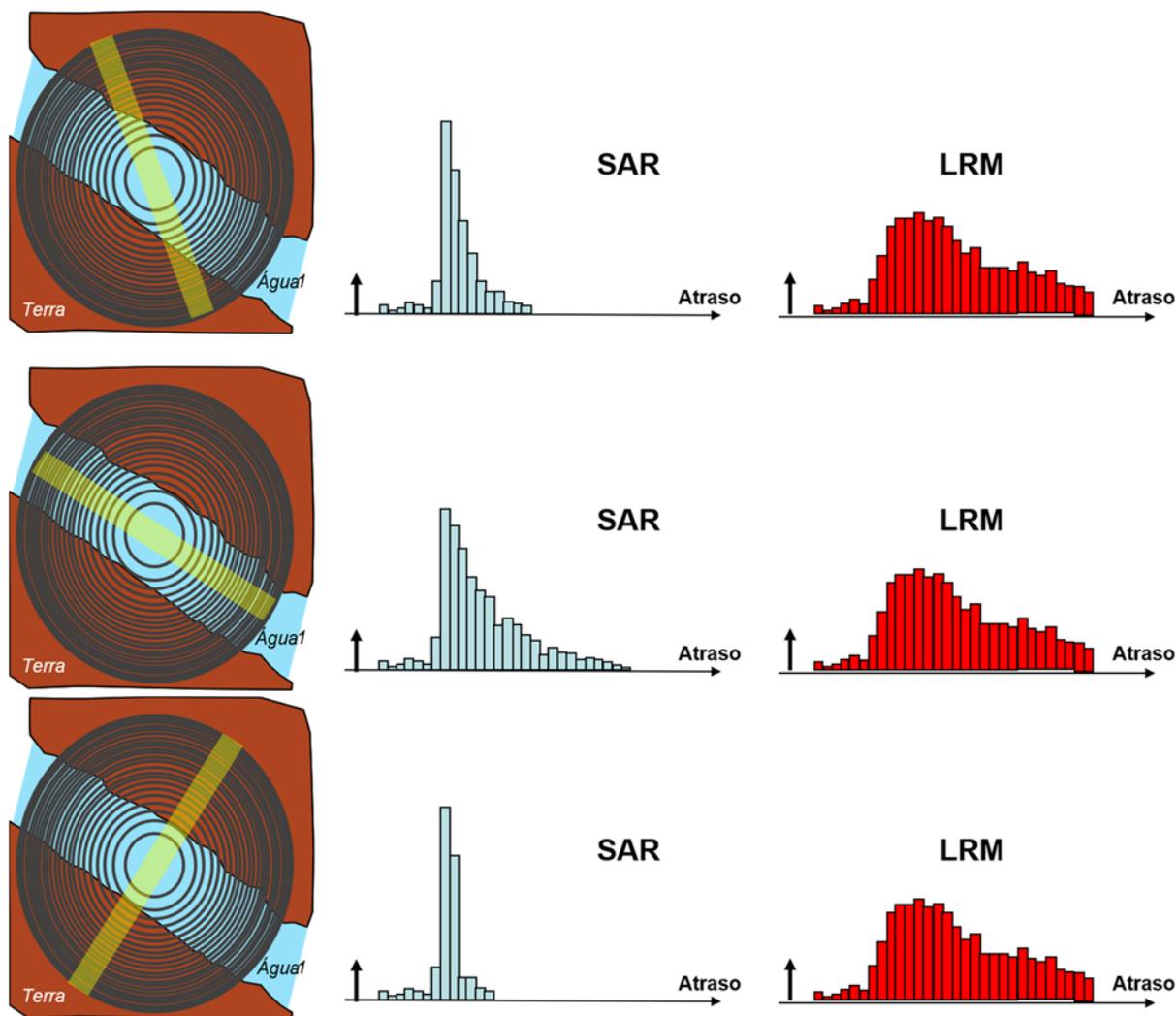
*Eco de altimetria Doppler sobre o oceano (esquerda) e sobre um rio (direita).*

## O que é que efetivamente reflete a onda radar do altímetro? (ou: o que se observa realmente?)

A "pegada" (ou "mancha no solo"), ou seja, a zona sobre a qual é refletida a onda radar antes de voltar ao altímetro, depende da altitude do satélite (723, 790 ou 1336 km), da resolução do "intervalo ou *gate*" da **waveform** (relacionada com a largura de banda do altímetro), da abertura e do ganho da antena, bem como da duração da medição (ou número de "*gates*"). Assim, o raio da pegada pode variar entre 4.8 e 9.5 km, dando origem a superfícies de aproximadamente 290 km<sup>2</sup> para o Jason (a uma altitude de 1336 km) e 100 km<sup>2</sup> para o Saral. Com a técnica de *Delay Doppler*, que permite dividir esta superfície em várias "fatias", a área observada é substancialmente reduzida, mas continua a ser de aproximadamente 5 km<sup>2</sup>. Observando os rios e até pequenos lagos, é praticamente certo que neste tipo de zonas não existe apenas água. Tendo isso em conta, caso se considere apenas a frente crescente e os primeiros intervalos do eco, limita-se essa superfície até um certo ponto, mas é possível que se perca alguma informação.



*A presença de terra na pegada pode perturbar o eco, sendo essa perturbação tão mais intensa quanto mais refletivo for o solo.*



*Ecos nos modos SAR ou convencional (LRM) de acordo com as respectivas posições da trajetória do satélite (perpendicular aos retângulos do modo SAR) e do curso de água.*

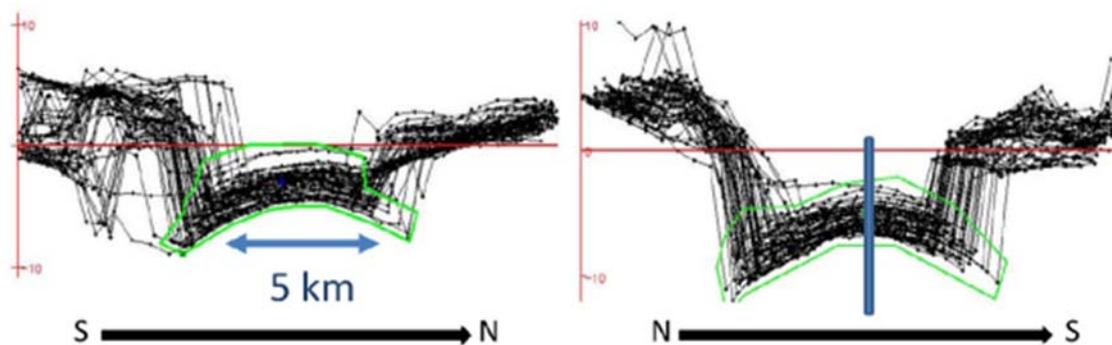
As condições de aquisição das medidas altimétricas nos grandes lagos e mares interiores são muito semelhantes às condições oceânicas. Com superfícies de água extensas, e considerando pontos suficientemente afastados das margens e dos relevos circundantes, obtêm-se principalmente ecos denominados "de Brown".

Nos cursos de água o sinal é mais complexo devido à heterogeneidade das superfícies observadas. O sinal é refletido por uma mistura de superfícies de diferentes tipos e com diferentes refletividades, cursos de água, florestas, pântanos, etc. Isso afeta significativamente a forma do eco (por exemplo, ecos com picos múltiplos), e, em consequência, a capacidade de extrair a informação pretendida, em particular a medida de distância, resultando em medições menos precisas. Todos os dados de altimetria provenientes de superfícies heterogêneas devem ser reprocessados para produzir uma observação suficientemente precisa da elevação da superfície. O reprocessamento denomina-se "retracking" e utiliza algoritmos específicos (Ice1, Ice3, Sealce, etc.). Pode ajustar-se utilizando diferentes algoritmos em função do tipo de *waveform*, o que pode também limitar a zona considerada na observação, tendo em conta apenas o início do eco (as primeiras "gates").

Esses algoritmos de "retracking" baseiam-se em abordagens empíricas, uma vez que não existe um modelo analítico para além do usado em o oceano aberto (modelo de Brown). Estão em curso estudos para melhorar estes algoritmos. Uma das abordagens atualmente em desenvolvimento utiliza um modelo numérico de terreno (*digital terrain model*, DTM) e mapas de rugosidade (Legos). Outra abordagem analisa as waveforms anteriores e posteriores às processadas (Legos/Ifremer), com base no princípio de que devem ser semelhantes.

Além disso, ocasionalmente, observam-se reflexos nas superfícies com pouco declive e elevada refletividade (por exemplo, uma praia com areia molhada), tais como margens de cursos de água, que refletem a onda de radar. O

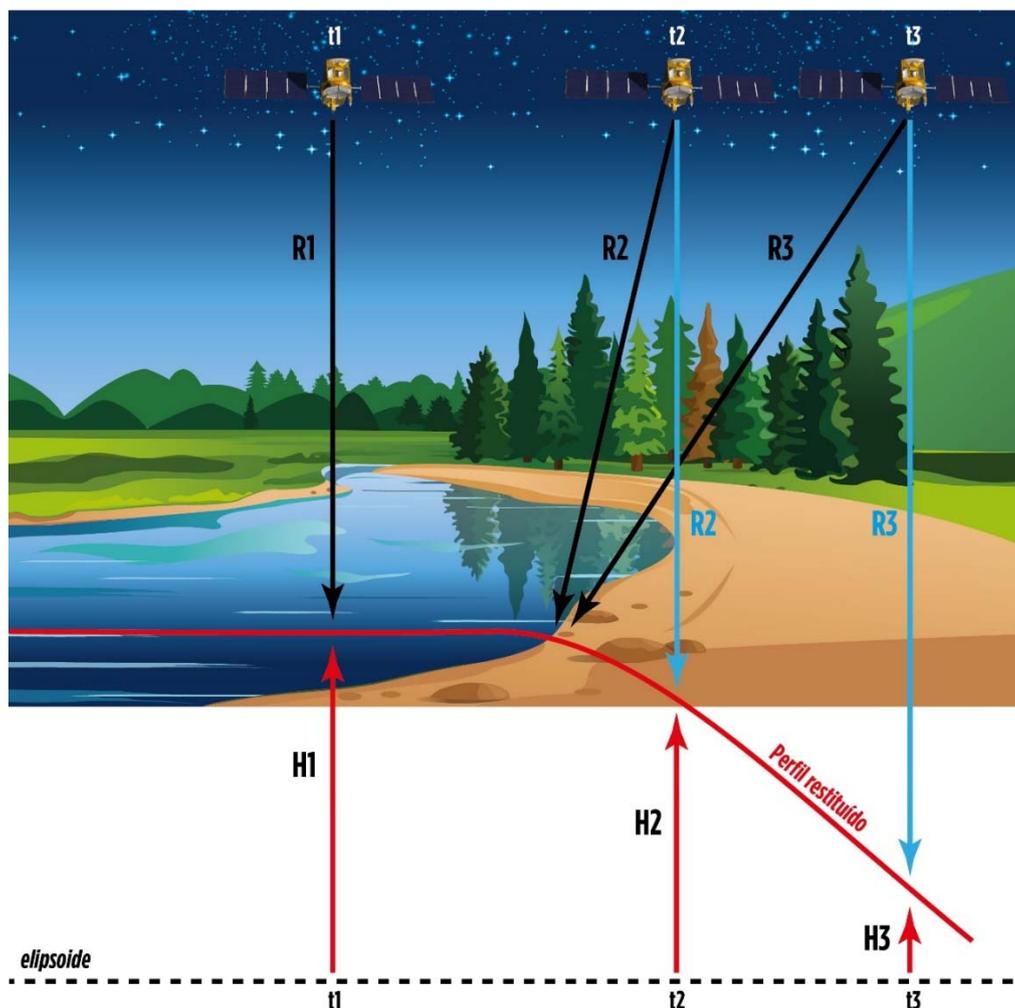
altímetro recebe então um sinal “parasita” que não se refere ao o nível da água (nem sequer à margem, uma vez que não provém do nadir).



Exemplo de sobreposição persistente no Rio Paro (Créditos S. Calmant, IRD)

Espera-se que os perfis hidrológicos dos lagos, rios e zonas de inundação, obtidos por altimetria de satélite, sejam planos ou ligeiramente inclinados, função do declive da massa de água. No entanto, em muitos perfis hidrológicos, observam-se estruturas parabólicas direcionadas para cima. Esta situação, denominada sobreposição (*hooking*), ocorre quando o altímetro continua a medir uma superfície refletora que acabou de sobrevoar, apesar de já não estar mais sobre a mesma. Consequentemente, o tempo do trajeto de ida e volta da onda é superior, conduzindo à subestimação da altitude da superfície (sobrestimação da distância do satélite à superfície). A deteção dessas parábolas permite, após correção geométrica, aumentar a quantidade de observações do curso de água, reduzindo assim a incerteza associada à medição. Tal é particularmente interessante para os cursos de água cuja largura reduzida limita o número de observações efetuadas pelo satélite (consultar a figura acima, em que o rio estreito, representado pela barra azul, é sujeito a amostragem ao longo de vários quilómetros graças ao *hooking*).

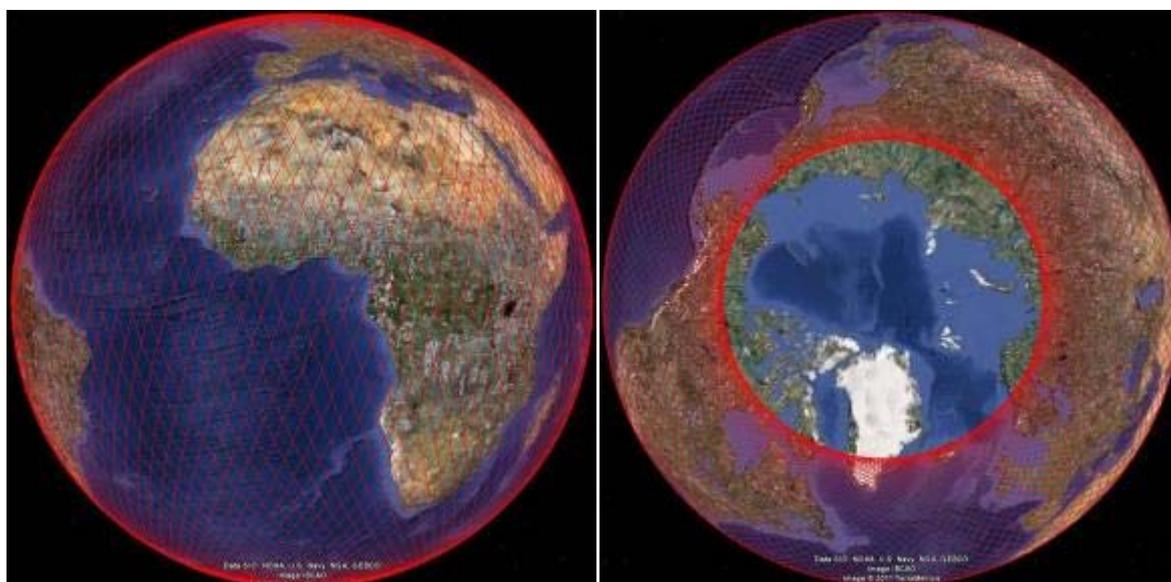
Utiliza-se a média ou mediana das medidas individuais da massa de água para eliminar o ruído aleatório. Geralmente, os dados de altimetria são fornecidos a duas resoluções diferentes, frequentemente no mesmo produto, sendo que uma, denominada "1 Hz", fornece uma medição média por segundo. A outra, cuja frequência depende do satélite (10, 20 ou 40 Hz), representa à média de  $1/10^\circ$ ,  $1/20^\circ$  ou  $1/40^\circ$  de segundo, fornecendo assim medições mais próximas, mas mais ruidosas. Isso corresponde a uma medida aproximadamente a cada 700 m (Topex/Poseidon), 350 metros (Envisat, Jason, etc.) e 175 metros (Saral).

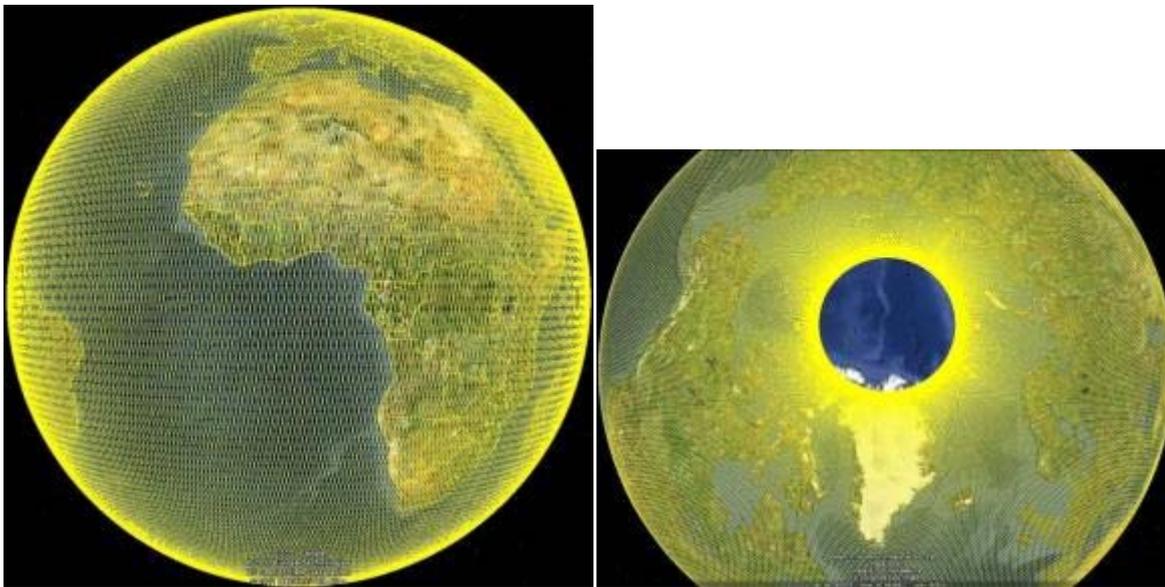


*Princípio esquemático da sobreposição persistente; a observação "oblíqua" prolonga a distância medida, resultando na percepção errada da elevação.*

## Cobertura espaciotemporal das medidas

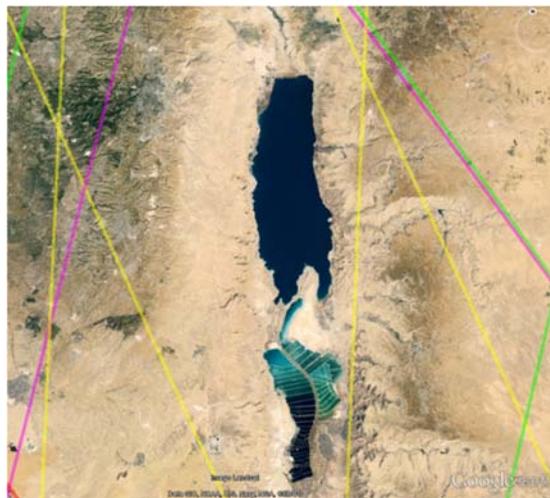
A altimetria atual não é uma técnica de produção de imagem: o satélite "apenas observa o que se encontra diretamente no nadir do mesmo. Além disso, a escolha da órbita de um satélite altimétrico é um compromisso entre a amostragem espacial e a amostragem temporal: se um satélite passar frequentemente sobre o mesmo ponto (amostragem temporal elevada), irá cobrir menos terreno do que se tiver um período orbital mais longo (amostragem temporal inferior).





*Passes de Jason (em cima) e Saral (em baixo). O espaçamento da grelha é claramente menor para as missões Jason, e as medidas mais afastadas dos polos, mas o tempo de revisitação é de 10 dias, o que permite observar variações temporais com maior frequência.*

Assim, obtém-se uma malha de tamanho variável mas que nunca cobre a totalidade da superfície. Algumas das maiores massas de água podem não ser observadas por determinados satélites, como por exemplo o Mar Morto ou o Lago Hourtin (Gironde, França).



*Passes de Jason-1, Envisat e GFO em torno do Mar Morto.*

Para ultrapassar este problema, uma das soluções consiste em combinar as medidas de vários satélites. Deste ponto de vista, as técnicas implementadas ao longo de mais de vinte anos, de combinação de medidas de satélites em órbitas com ciclos de repetição de 10 dias, 35 dias e mais, permite o processamento, para fins hidrológicos, de arquivos de dados combinados de três gerações de satélites: Topex/Poseidon/ERS-1 e 2, Jason-1/Envisat e Jason-2/Saral. Espera-se agora que o Jason-3, o Sentinel-3A e o Sentinel-3B, assegurem uma cobertura espaciotemporal única, que se prolongará durante a próxima década (Jason-CS, Sentinel-3C e D).



*Passes dos satélites Sentinel-3A e 3B, novamente sobre o Mar Morto.*

Outra abordagem para os rios, consiste em modelar o que acontece a jusante das medidas adquiridas pelo satélite. Utiliza-se a observação espacial como se uma estação hidrográfica estivesse instalada no local onde o passe do satélite cruza o corpo de água, em conjunto com dados meteorológicos para modelar o que acontece a jusante. A contribuição das observações de altimetria é particularmente significativa no caso de bacias transfronteiriças, já que permite aos países localizados a jusante de dispor de informação sobre o estado das variáveis hidrológicas nas partes a montante das bacias.

No entanto, a amostragem temporal reduzida torna a utilização direta das medidas de altimetria pouco adequada para alertas rápidos em caso de cheias. Contudo, estas podem ser utilizadas para avisos de eventos a jusante (<http://floodlist.com/asia/bangladesh-expand-servir-satellite-flood-warning-system>) e também posteriormente para compreender e modelar os eventos em causa.

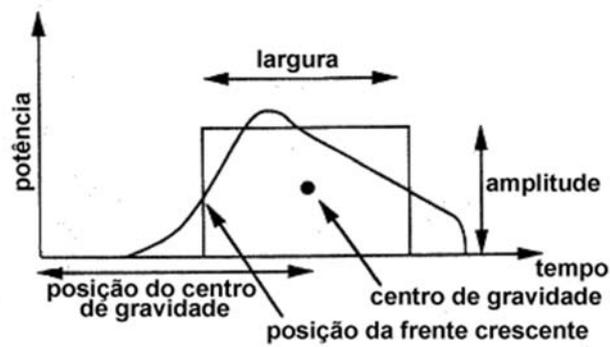
## Do eco à altitude da superfície hidrográfica

Conforme já foi mencionado, a distância satélite-superfície é deduzida a partir do eco de radar. Num eco de "oceano" típico (ou lago grande), esta estimativa baseia-se na abcissa do ponto a meia altura da parte com o declive mais acentuado (a frente crescente; considera-se a distância relativa à altura média das ondas). Em casos mais complexos, como por exemplo quando ocorrem vários "picos", como se verifica frequentemente nas águas continentais, a situação é mais complexa, utilizando-se outros algoritmos designados de "retracking" para estimar esta distância.

### □ Algoritmos baseados

num método de corte (*threshold*)

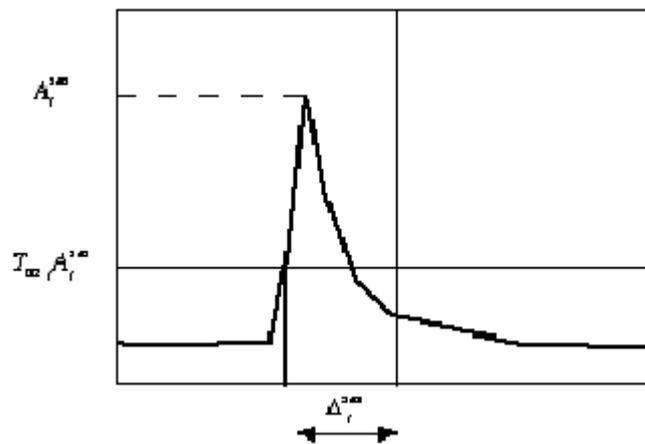
- Ice1 (Wingham et al., 1986): inicialmente desenvolvido para o estudo das calotes polares. O princípio consiste em definir um retângulo cujo centro de gravidade coincida com o da waveform. De seguida, considera-se a abcissa do primeiro ponto cuja potência alcança uma determinada percentagem da amplitude deste centro de gravidade (30% neste caso).



Princípio do algoritmo Ice1 (segundo Wingham et al., 1986)

O Ice3 funciona de acordo com o mesmo princípio que o Ice1, mas apenas analisa uma parte limitada da waveform (o fim do eco é ignorado).

- Sea-Ice (Laxon, 1994): algoritmo utilizado para o estudo do gelo marinho

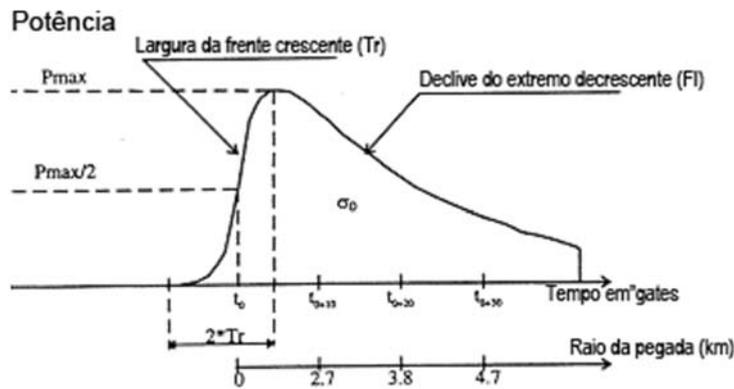


Princípio do algoritmo Sea Ice (Laxon, 1994)

Estas três abordagens de "retracking" são empíricas (e não baseadas em leis físicas formuladas matematicamente); não têm em conta as características de cada instrumento, e apenas fornecem a distância satélite-superfície e o coeficiente de retrodifusão (backscatter), não os outros parâmetros que se podem extrair dos ecos. O Ice1 é o utilizado mais frequentemente em aplicações hidrológicas. O Ice3 melhora os resultados, mas apenas é fornecido aos utilizadores no caso do Jason-2.

□ Algoritmo baseado no ajuste de waveforms reais a modelos teóricos da waveforms

- Ocean [Brown, 1977]: algoritmo de base utilizado desde as primeiras missões de altimetria. Utiliza-se um algoritmo de estimativa de máxima verosimilhança (Maximum Likelihood Estimation, MLE) baseado em três ou quatro parâmetros ("MLE3" ou "MLE4").
- Ice2 [Legrésy e Remy, 1997]: criado para o estudo das calotes polares da Antártica e da Gronelândia.



Waveform teórica usada no Ice2

- O Red3 analisa apenas uma parte do eco (-10; +20 amostras relativamente à frente crescente) com um estimador de máxima verosimilhança (usando três parâmetros: distância, amplitude e Sigma composto);
- O Oce3 funciona de acordo com o princípio da máxima verosimilhança com três parâmetros (MLE3), mas num eco previamente filtrado a fim de reduzir o ruído.

Com exceção do Ice2, estes métodos são sobretudo adaptados ao oceano e, eventualmente, aos grandes lagos ou massas de água.

- Método de reconhecimento de formas: as waveforms são ordenadas em função da sua forma; é aplicado um algoritmo de reprocessamento adaptado a cada tipo identificado.
- O Retracker adaptativo combina várias melhorias testadas em diferentes estudos. Utiliza um parâmetro de rugosidade da superfície que permite ter em conta diferentes tipos de superfície. Adapta a análise ao comprimento útil do eco, de acordo com a respetiva classe. Também tem em conta a resposta do impulso real do instrumento, e não a de um impulso teórico. Isso permite chegar o mais perto possível da waveform, independentemente do tipo de superfície, sem recorrer a algoritmos diferentes, fornecendo todos os parâmetros que é possível extrair dos ecos (distância satélite-superfície, mas também declive e amplitude da frente crescente e declive do extremo decrescente).

## Da altitude da superfície às variáveis hidrográficas

Geralmente o altímetro não segue os rios ao longo do seu curso. Em vez disso, atravessa-os em determinados pontos. Assim, define-se o conceito de "estação virtual": é como se existisse uma estação hidrográfica no ponto onde em média o satélite atravessa o curso d'água. Esta medida pode ser depois utilizada como uma observação *in situ*, salvo o facto de não se conhecer com precisão a profundidade do curso d'água neste ponto; assim, trabalha-se mais com base nas variações de altitude do que na profundidade (altitude absoluta da água relativamente ao fundo do leito do curso d'água). Em comparação com as bases de dados *in situ* clássicas, a altimetria de satélite fornece observações com uma resolução espacial superior (mesmo que os possíveis pontos de observação sejam predeterminados pela órbita do satélite, existem mais estações virtuais do que estações *in situ*) mas com uma resolução temporal inferior. No entanto, em muitos casos, as bases de dados *in situ* apenas são atualizadas periodicamente, sendo que a única informação disponível quase em tempo real é a dada pelas observações por satélite.

As medidas altimétricas de da altitude podem ser combinadas com imagens óticas ou imagens de radar obtidas por outros satélites (Spot, Pleiades, Sentinel-3, Sentinel-2, Sentinel-1, CosmoSkyMed, TerraSAR, etc.) para determinar a extensão de uma massa de água. É assim que se calculam as variações do volume da água.

Além disso, o caudal de um curso d'água pode ser calculado a partir de uma combinação da altitude e de outros dados. Foram desenvolvidos modelos de diferentes níveis de complexidade (curvas de calibração da altitude/caudal,

modelos hidráulicos, métodos de assimilação, etc.), integrando diferentes quantidades de dados auxiliares (batimetria, etc.). Geralmente, os métodos baseiam-se na existência de uma relação unívoca entre a variação da altitude e a variação do caudal. Estudos recentes, abordando várias bacias em todo o mundo, demonstraram a possibilidade de obter os caudais a partir das altitudes de água. A melhoria destes estudos é um dos contributos mais importantes para a preparação da missão SWOT. A combinação de estudos no âmbito da meteorologia e da altimetria oferece boas perspetivas para a melhoria do conhecimento do caudal dos cursos d'água.

## Qual o nível de precisão?

A precisão da medida altimétrica em hidrologia depende consideravelmente da massa ou do curso d'água que se pretende observar, bem como do ambiente circundante. A geometria do traço do satélite no terreno relativamente ao curso de água, as margens, o relevo, a vegetação, etc. têm que ser levados em consideração.

São vários os fatores que afetam a precisão das medidas altimétricas sobre as massas de água continentais. As correções ambientais são uma das possíveis causas de erro. Ainda mais importantes são as incertezas relacionadas com a largura do feixe e a pegada do radar. O facto de ter vários quilómetros de extensão faz com que a maior parte dos ecos derive de uma mistura de água, ilhas e margens (se forem planas). Estas misturas, assim como os ecos muito intensos do nadir em massas d'água lisas, dificultam a determinação da altitude através dos algoritmos existentes. Os resultados obtidos com cada algoritmo dependem da envolvente da estação virtual (vegetação, relevo, tipo de leito, margens encaixadas ou planas, etc.). Além disso, a experiência mostra que os erros que afetam uma estação virtual também afetam um sensor (ou uma missão).

A distância satélite-superfície é estimada com uma precisão de 2 centímetros sobre os oceanos. Esta pode corresponder a cerca de 5 cm sobre grandes lagos (grandes superfícies de água observadas pelo altímetro como fossem oceano). Nos rios, geralmente, a precisão para os altímetros convencionais não é melhor que 15 a 20 cm para as melhores estações virtuais (com o melhor contraste radiométrico), e pode alcançar até 60 a 80 cm para as estações virtuais menos precisas. As tecnologias SAR e InSAR começaram a ser objeto de estudo, e apresentam resultados a priori melhores do que a altimetria clássica, mas sempre dependentes de um elevado número de fatores relacionados com o curso d'água e ao seu respetivo ambiente.

Por último, é importante destacar que os dados altimétricos são fornecidos com diferentes latências em relação à medição. A menor latência é 2 horas, depois 24 a 48 horas e por fim 30 a 75 dias. Estes prazos adicionais destinam-se a recolher dados auxiliares (provenientes dos modelos meteorológicos), mas sobretudo a calcular com maior precisão a altitude, uma vez que, ao esperar mais tempo, conhece-se a trajetória do satélite na respetiva órbita, permitindo realizar cálculos mais precisos. Nas superfícies hidrológicas, a melhoria entre os dados recebidos após 24/48 horas e os dados recebidos após 30 dias não é necessariamente significativa. Consequentemente, a escolha entre estes tipos de dados vem do tipo de utilização pretendida, entre uma utilização operacional (que implica dados de entrega rápida) e um estudo a longo prazo (em que apenas estarão disponíveis os dados com o maior latência ao longo da vida útil de um satélite).

## Dados disponíveis

Na altimetria clássica para hidrologia, estão disponíveis duas grandes categorias de dados:

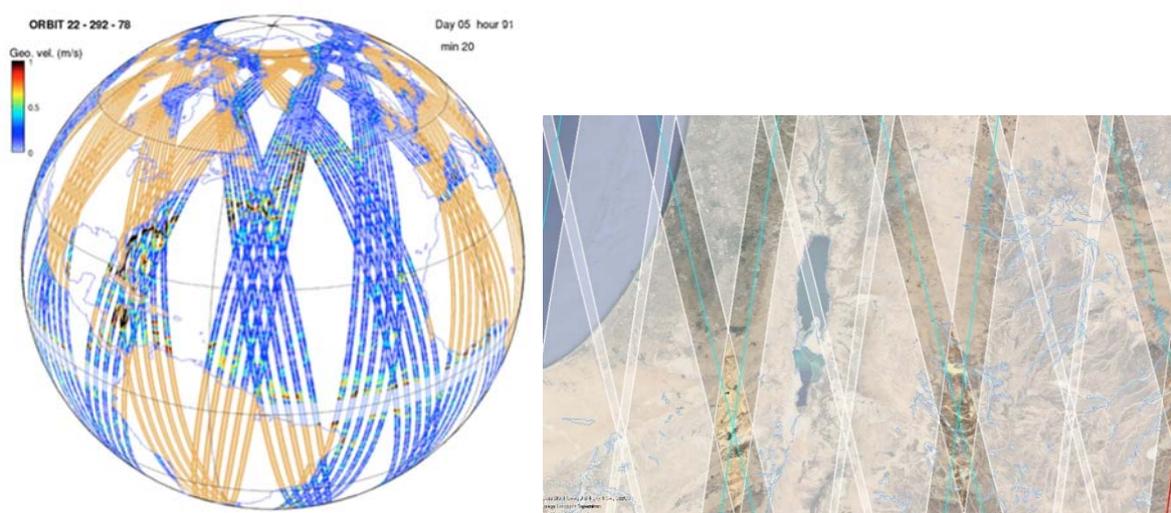
- Os dados do tipo "Geophysical Data Records" (GDR) e "Sensor Geophysical Data Records", que contêm todos os elementos necessários para calcular a altitude da água a cada 1 s e 1/20° s ao longo do traço de cada satélite; atualmente, esses dados são fornecidos no formato "NetCDF", auto descritivo e padronizado (esse ainda não é o caso de todos os dados da década de 1990). Também existem variantes que contêm

algoritmos muito recentes, que podem ser mais interessantes para a hidrologia. Estes dados são completos, mas a sua utilização é bastante complexa.

- Dados do nível de água "pré-calculados" em determinados cursos d'água e lagos, frequentemente fornecidos em formato de texto (incluindo csv). São muito mais simples de utilizar, mas não são calculados em todos os locais. De acesso livre e gratuito, estas bases de dados têm por objetivo catalogar os níveis de água por satélite no maior número possível de cursos d'água, com o objetivo de oferecer aos mais diversos utilizadores (governos, institutos de investigação, gabinetes de estudo, etc.) a possibilidade de monitorizar os recursos hídricos (por exemplo [hydroweb.theia-land.fr](http://hydroweb.theia-land.fr)).

## O futuro com a missão SWOT

A futura missão de altimetria SWOT (Surface Water and Ocean Topography, NASA/CNES/CSA/UKSA) será profundamente diferente das anteriores. Concretamente, a missão SWOT não só fornecerá medidas da altitude, como também poderá estimar larguras ou extensões de água. Adicionalmente, os dados terão o formato de uma imagem: uma grelha de medidas que se estende por duas bandas de 50 km de largura, de cada lado de uma banda de 20 km, no meio da qual apenas será efetuada a medida nadiral clássica. Além da vantagem de obter dados a duas dimensões e nomeadamente declives em todas as direções, também será possível cobrir praticamente a totalidade da superfície do globo, sem, ou quase sem, as lacunas das grelha dos satélites anteriores.

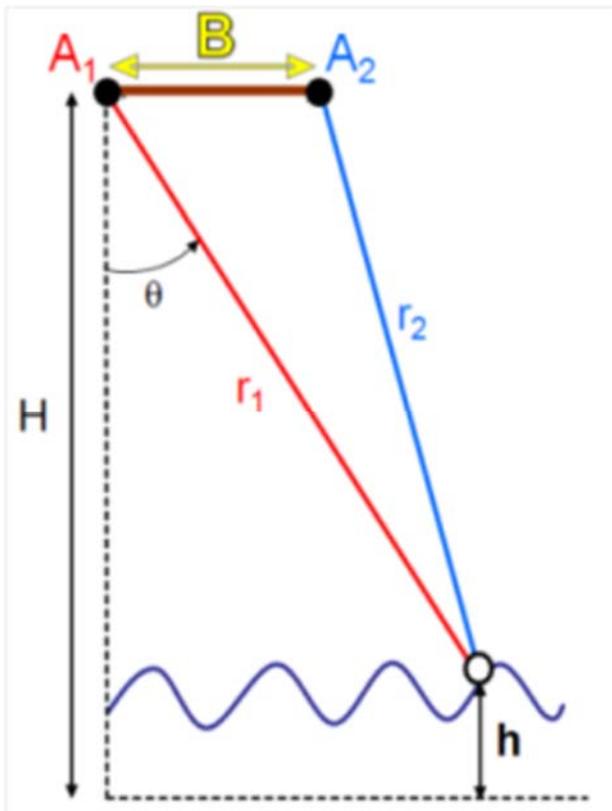


*Passes do SWOT durante 5 dias (dos 22 do ciclo completo)*

*Zoom de passes SWOT sobre terra*

O satélite terá duas antenas, uma em cada lado do módulo principal. Estas funcionam de acordo com o princípio de radar de abertura sintética em modo interferométrico (InSAR), mas emitem muito mais perto do nadir do que outros instrumentos deste tipo, entre 0 e 4° (ao contrário dos 30° usuais nos SAR uimagem). Tal como nos altímetros no "modo SAR" ou "Delay-Doppler", a posição de cada ponto da superfície na qual ocorre a reflexão é deduzida por efeito Doppler.

A emissão da onda radar será feita a partir de uma das duas antena, alternadamente na direção da faixa no solo relativa a essa antena e em seguida na da faixa relativa à outra antena. A onda é recebida pelas duas antenas após reflexão na superfície. A medida das diferenças de fase entre os dois ecos recebidos permite medir diferenças de distância entre os respetivos pontos.



A1 e A2 representam uma antena. B é a distância entre as duas, fixa e conhecida;

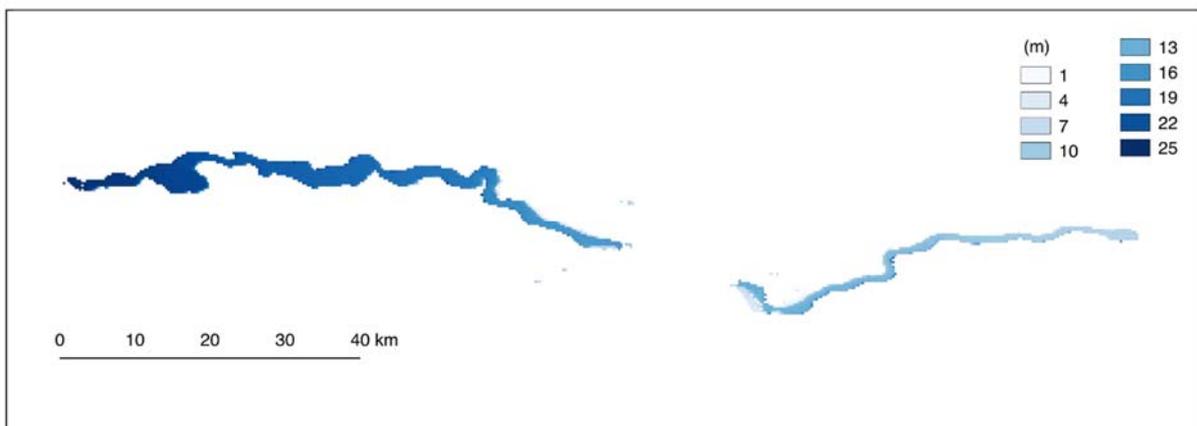
$r_1$  é medido como na altimetria clássica pelo tempo de ida-volta e H é conhecido a partir do conhecimento da órbita do satélite.

O ângulo  $\vartheta$  é deduzido medindo a diferença de fase entre as duas ondas recebidas por cada antena, com base nas interferências entre essas ondas. No entanto, por definição, esta fase apenas é conhecida a menos de um múltiplo de  $2\pi$ . O conhecimento da topografia do terreno através de um DEM permite eliminar essa ambiguidade.

Quando todas as quantidades forem conhecidas, deduz-se  $h$  :  
 $h = H - r_1 \cos(\vartheta)$

O objetivo anunciado para SWOT para 2021 consiste em alcançar uma precisão sobre terra superior a 10 cm numa

superfície de 1 km<sup>2</sup>, para uma resolução elementar de 5 m (na direção do movimento, along-track) x 10-70 m n (na direção perpendicular, across-track)



Dados SWOT simulados sobre um rio: Exemplo de produto "raster" do SWOT, rio Pó, Itália (Altitudes (m), Grelha com células de 10 segundos de arco)

### Produtos hidrológicos fornecidos pelo SWOT

Foram definidos quatro produtos principais. O que se encontra no estado mais bruto está no formato NetCDF, os outros 3 no formato shapefile, compatível com software de SIG. Os produtos específicos para rios e lagos estão ligados a a bases de dados *a priori*, que serão atualizadas durante a missão.

#### Produtos de "rio"

Cada rio com mais de 30 m de largura é definido numa base de dados *a priori* sob a forma de linha central ao longo do rio dividida em secções de cerca de 10 km de comprimento, ou como nós a cada 200 m ao longo desta linha.

Os produtos de rio são fornecidos de acordo com as duas categorias identificadas na base de dados *a priori*. O produto "nó" inclui variáveis como a largura, altitude, superfície inundada, etc. médias para cada nó, e o produto "secção" inclui a altitude média, declive médio, caudal médio, etc. para cada uma das secções do rio.

Estes produtos são fornecidos para cada passagem do satélite.

O produto "secção" também é fornecido por ciclo, sendo que nesse caso os valores das variáveis são fornecidos em cada uma das diferentes passes desse ciclo do satélite (21 dias) nas quais foi medida a totalidade ou parte da secção do rio.



*Definição da secção de um rio*



*Definição dos nós de um rio*

### Produtos de "lago"

São consideradas como "lago" todas as superfícies de água conhecidas que não sejam rios e tenham uma área superior a um hectare.

Para cada passagem do satélite e para cada ponto observado sobre o lago, o produto fornece uma série de dados : altura, área, contorno, etc.) .

Para cada objeto que possa estar relacionado com um elemento da base de dados de lagos a priori, é adicionada informação de identificação.

O produto por cada ciclo inclui um contorno mediano, a altitude média dos lagos nas passagens em que são observados na sua totalidade (as observações de apenas uma parte do lago não são consideradas). Também serão considerados outros casos de maior complexidade (vistas de diferentes partes do lago em cada passagem).

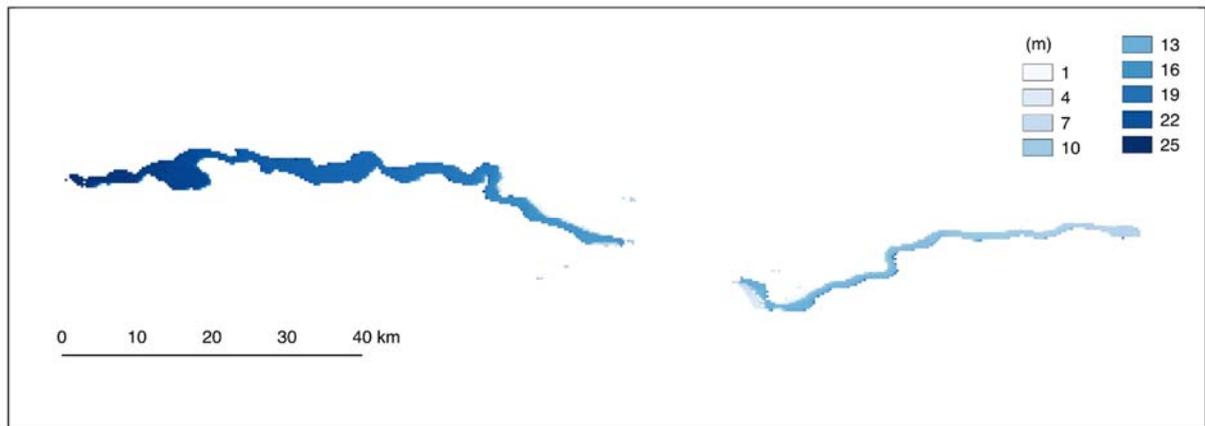


Aplicado um esquema composto multitemporal de tamanho mediano

Área máx.: 4,80 km<sup>2</sup>, área mín.: 1,89 km<sup>2</sup>, área desvio padrão: 0,94 km<sup>2</sup>, área mediana.: 3,25 km<sup>2</sup>.

*Ilustração da definição dos contornos de um lago (Figura cortesia de Y. Sheng)*

## Produto "raster"



Dados SWOT simulados sobre um rio: Exemplo de produto "raster" do SWOT, rio Pó, Itália (Altitudes (m), Grelha com células de 10 segundos de arco)

Um produto "raster" (vide exemplo do rio Pó, acima) será sistematicamente gerado pelo produto "pixel cloud". Estará em formato NetCDF 2D, cobrirá 4 quadrantes de nuvens de pontos (as 2 faixas e 120 km ao longo da trajetória) e será fornecido em 2 resoluções: 100 m e 250 m. Os pontos da "pixel cloud" são projetados numa grelha regular de acordo com uma projeção "Universal Transverse Mercator" (UTM). Trata-se de um produto por passagem.

Também pode ser gerado mediante pedido (através do portal de divulgação de dados, AC):

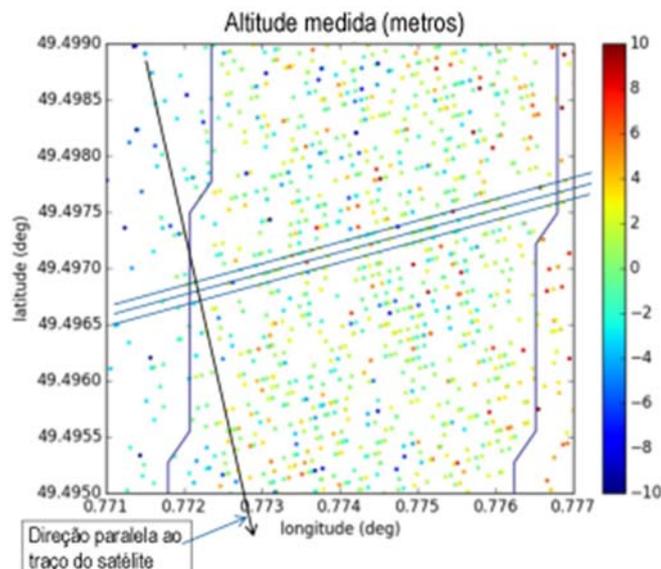
- formato: NetCDF, GeoTiff, etc.),
- variáveis,
- resolução (>100 m) e zona definida pelo utilizador, com um limite do volume de dados descarregados.

## Produto "nuvem de pontos"

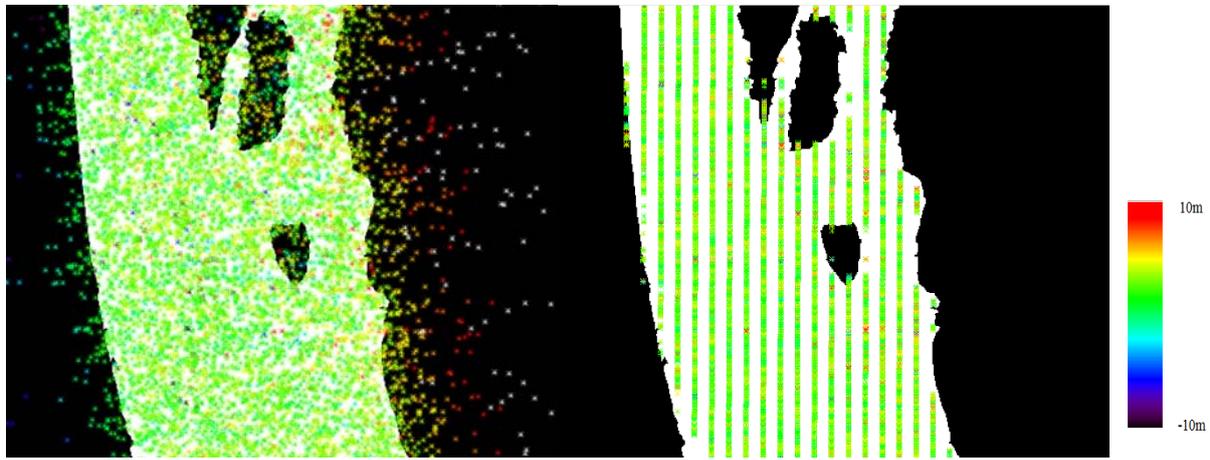
É o produto que se encontra no estado mais bruto nas superfícies continentais. Um arquivo, em formato NetCDF, abrange um quadrante, que corresponde a um lado da faixa (esquerdo ou direito) em 60 km ao longo do traço do satélite.

O produto fornece longitude, latitude, altitude, tamanho do pixel e correções para cada ponto classificado como sendo água, para os pontos numa zona em torno de cada zona de água, bem como em zonas sistematicamente incluídas (definidas de acordo com uma máscara *a priori*).

Este produto é gerado para cada passagem do satélite.



Produto "nuvem de pontos" numa das faixas



*(Esquerda: "pixel cloud" bruto. Direita: produto com geolocalização melhorada.)*