

Altimetria por Satélite operacional na FCUP

Eliana VIEIRA^{1*}, M. Joana FERNANDES^{1,2}, Clara LÁZARO^{1,2}

¹ Faculdade de Ciências, Universidade do Porto (Portugal)

² Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (Portugal)

(eliana.vieira@fc.up.pt; mjferman@fc.up.pt; clazaro@fc.up.pt)

Palavras-chave: Altimetria por satélite, correção da troposfera, GPD+, Processamento Automático

Resumo: As missões de satélites altimétricos têm vindo a fornecer dados cada vez mais precisos, possibilitando o conhecimento do nível do mar com uma exatidão de poucos centímetros.

No âmbito de diversos projetos financiados pela Agência Espacial Europeia (ESA), a equipa de Altimetria por Satélite da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) tem desenvolvido metodologias de melhoramento dos produtos altimétricos. Destas, destaca-se o algoritmo *GNSS-derived Path Delay Plus* (GPD+) que determina o atraso devido à componente húmida da troposfera na propagação dos sinais dos satélites, melhorando a sua estimativa em particular nas zonas costeiras e polares.

Este artigo descreve uma metodologia de automatização do processo de criação das correções GPD+, em resposta à solicitação da ESA para fornecer de forma operacional e diária esta correção para a missão Cryosat-2, para integração nos produtos de nível 2 deste satélite.

O processo envolve a manipulação de um grande volume de dados de atrasos troposféricos de diversas fontes, como por exemplo Sistemas Globais de Posicionamento e Navegação por Satélite e radiómetros de micro-ondas a bordo de vários satélites de Detecção Remota. A metodologia foi ainda estendida à geração de forma regular e periódica dos produtos GPD+ para as várias missões altimétricas. Estes produtos são divulgados na página oficial de Altimetria por Satélite da FCUP, assim como na página do *Center for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere* (CTOH) do AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*).

1. Introdução

O início, em 1991, de uma série de satélites altimétricos que veio a gerar um conjunto contínuo de medidas precisas e consistentes, impulsionou o desenvolvimento de numerosos estudos com forte impacto no oceano, zonas costeiras e regiões polares. Entre estes destaca-se o estudo da variabilidade do nível do mar que pode ser obtida com uma precisão de poucos centímetros. Para garantir esta precisão, é necessário aplicar correções às medidas efetuadas pelo altímetro a bordo de cada satélite altimétrico. O atraso causado nos sinais altimétricos e nos sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System*), devido à componente húmida da troposfera, i.e. à presença de vapor de água na atmosfera, é relativamente pequeno, mas de difícil estimação devido à grande variabilidade da distribuição do vapor de água, quer no espaço quer no tempo. A correção devida a este efeito (WTC, *Wet Tropospheric Correction*), que em valor absoluto pode chegar aos 50 cm (Fernandes et al., 2013a) é determinada com grande precisão a partir das observações de radiómetros de micro-ondas (MWR, *MicroWave Radiometer*), instrumentos colocados a bordo dos satélites altimétricos. A WTC pode ainda ser determinada usando parâmetros de modelos atmosféricos numéricos, como, por exemplo, o ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*), usando medidas em terra através de redes de estações GNSS permanentes tais como o IGS (*International GNSS Service*) SUOminet e EPN (*EUREF Permanent Network*), ou usando medidas de sensores de imagem existentes em satélites de Detecção Remota, que serão designados neste artigo como SI-MWR (Fernandes et al., 2014).

Sendo os algoritmos de processamento dos MWR desenhados para operação sobre o oceano, as suas medidas ficam inválidas quando a pegada do instrumento inclui outro tipo de superfície, tal como terra ou gelo, dificultando o cálculo da WTC nas regiões costeiras e polares. Esta característica da WTC calculada a partir de medidas MWR e os erros a ela associados, têm sido o foco de vários estudos ao longo dos anos (ver por exemplo, Desportes et al., 2007; Fernandes et al., 2013a; Fernandes et al., 2014).

A equipa de Altimetria por Satélite da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) tem desenvolvido metodologias de melhoramento da WTC no âmbito de diversos projetos (COASTALT, CP4O and SL_cci) financiados pela ESA (*European Space Agency*). O algoritmo *GNSS-derived Path Delay Plus* (GPD+) é a versão mais recente destas metodologias desenvolvidas pela equipa, melhorando a estimativa da WTC para as várias missões altimétricas. Com base neste algoritmo, é possível melhorar também as quantidades que dependem desta correção, como é o caso da medida SLA (*Sea Level Anomaly*), a variável efetivamente usada, por exemplo, no estudo da variação do nível do mar.

De uma forma simplificada, o algoritmo GPD+ tem como objetivo obter uma estimativa válida da WTC para cada ponto de passagem do altímetro radar, cujas medidas simultâneas adquiridas pelo MWR a bordo do mesmo satélite são inválidas, através da combinação de medidas válidas existentes na vizinhança do ponto em causa. Embora tenha sido originalmente criado para a melhoria da WTC em zonas costeiras, a correção GPD+ pode ser calculada continuamente para a posição e tempo de passagem do altímetro radar de cada satélite, sobre qualquer tipo de superfície (oceano, terra, etc.), substituindo as medidas do MWR contaminadas por terra e gelo bem como medidas suspeitas devido, por exemplo, ao mau funcionamento do instrumento. Ao longo do tempo, esta metodologia foi adaptada e aplicada às oito missões altimétricas principais: ERS-1/2, Envisat, Topex/Poseidon, Jason-1/2, Cryosat-2 e SARAL. Mais detalhes sobre o algoritmo são apresentados na secção 2 e podem ser encontrados em Fernandes et al. (2015) e Fernandes e Lázaro (2016).

A missão Cryosat-2 (CS-2) diferencia-se das restantes missões altimétricas pelo facto de não existir um MWR a bordo do satélite, uma vez que a missão foi inicialmente pensada para medir e monitorizar a variação na espessura do gelo nas regiões polares, e, portanto, a WTC aplicada aos dados do altímetro radar seria baseada no modelo atmosférico ECMWF. No entanto, com a perda do Envisat em abril de 2012 houve um aumento do uso de dados do CS-2 para aplicações também sobre oceano.

Uma vez que para o estudo do oceano e sobretudo em zonas costeiras é exigida uma precisão elevada das medidas (1-3 cm), o GPD+ foi adaptado e melhorado para o CS-2 no âmbito do projeto “CryoSat Plus for Oceans (CP4O)” (Fernandes et al., 2013b). Nesta versão do algoritmo, que é baseada nas metodologias abordadas em publicações anteriores (Fernandes et al., 2010; Fernandes et al., 2013a; Stum et al., 2011), utiliza-se uma análise objetiva para combinar todos os dados de GNSS e de sensores imagem (SI-MWR), disponíveis para todos os pontos do altímetro radar. Na ausência destes ou no caso destes serem inválidos, o GPD+ é igual à WTC calculada utilizando os parâmetros atmosféricos do modelo ECMWF.

O projeto “Cryosat IPF/COP Maintenance and Evolution Support” (Cryosat) financiado pela ESA impulsionou a automatização dos procedimentos envolvidos na criação dos produtos GPD+. Neste projeto, foi solicitado à equipa de Altimetria por Satélite da FCUP o fornecimento operacional, e diário, das correções GPD+ utilizando como referência os produtos IOP P2P (*Level-2*

Intermediate Ocean Product Pole to Pole) do CS-2 disponíveis no site da ESA. No final, o GPD+ é fornecido pela ESA nos produtos GOP P2P (*Level-2 Geophysical Ocean Product Pole to Pole*) do CS-2 e estão disponíveis também no site da ESA, assim como os produtos derivados que utilizam o GPD+ como correção de referência, como é o caso dos que contêm a medida SLA.

Este artigo tem como objetivo descrever o processo envolvido no fornecimento operacional do produto GPD+ para o projeto Cryosat. Pretende-se ainda descrever a extensão da automatização de processos para a criação de forma regular e periódica dos produtos GPD+ para as várias missões altimétricas disponibilizadas pelo RADS (*Radar Altimetry Database System*), produtos esses divulgados na página oficial de Altimetria por Satélite da FCUP, assim como na página do *Center for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere* (CTOH) do AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*).

A secção 2 descreve o algoritmo GPD+, a secção 3 retrata os procedimentos envolvidos na automatização de processos para o fornecimento operacional para o projeto Cryosat e para o cálculo do GPD+ para os produtos do RADS, e na secção 4 são apresentadas as conclusões deste artigo.

2. O algoritmo GPD+

2.1 Descrição Geral

A metodologia GPD tem origem num algoritmo criado para melhorar a WTC em regiões costeiras, reduzindo os efeitos da contaminação nas medidas do radiómetro a bordo das missões altimétricas, pela proximidade de terra. Ao longo do tempo, esta metodologia estendeu-se para pontos em oceano aberto e superfícies não oceânicas, corrigindo as observações inválidas devido à contaminação terra, gelo ou chuva, ou a defeitos no próprio instrumento.

O GPD+ consiste, então, na correção WTC que é:

- (1) igual à WTC calculada usando medidas do MWR a bordo do satélite, quando este existe e as suas medidas são válidas.
- (2) estimada usando combinação, através de análise objetiva (OA) no espaço e no tempo (Bretherton et al., 1976) de medidas de WTC de várias fontes disponíveis, sempre que se verifique que a WTC obtida através da abordagem (1) é inválida. Neste caso, são utilizadas medidas:
 - derivadas de produtos de vapor de água obtidos através de radiómetros imagem (SI-MWR) a bordo de vários satélites de Deteção Remota, desde que sejam válidas;
 - de ZTD (*Zenith Tropospheric Delay*) calculadas em estações GNSS costeiras e divulgadas pelas redes de estações permanentes a que pertencem;
 - de modelos atmosféricos, tais como o modelo ECMWF ReAnalysis (ERA) Interim ou o operacional (Op). O algoritmo é iniciado com a WTC calculada a partir do modelo (*first guess*) e, na ausência de observações, a estimativa GPD iguala este valor.

Para assegurar a consistência e estabilidade a longo termo da WTC, os radiómetros utilizados na estimação do GPD+ foram inter-calibrados usando como referência os instrumentos SSM/I (*Special Sensor Microwave Imager*) e SSM/IS (*Special Sensor Microwave Imager Sounder*) devido à estabilidade e calibração independente destes sensores.

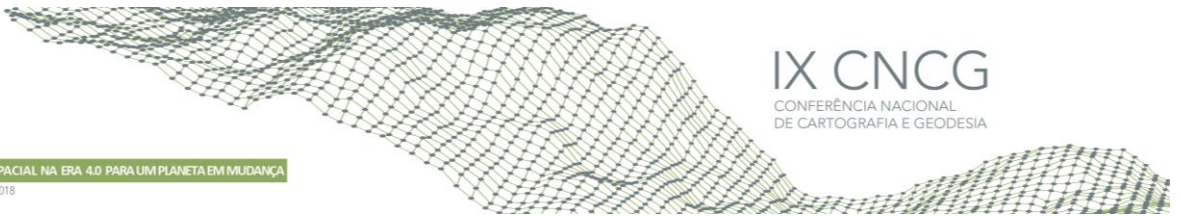
No caso do CS-2, que não possui radiómetro de bordo, o algoritmo GPD+ estima a correção para todos os pontos do traço do satélite, utilizando dados SI-MWR, GNSS e do modelo atmosférico.

Uma descrição mais detalhada do algoritmo GPD+ para os satélites Cryosat-2 e Geosat Follow-On (GFO) pode ser encontrada em Fernandes e Lázaro (2016).

2.1.1 – Descrição dos Dados de Input

Atualmente, os produtos originais abaixo descritos são utilizados para, após tratamento necessário, entrarem no algoritmo GPD+:

- Produtos de quantidade de vapor de água (TCWV, *Total Column Water Vapour*) dos radiómetros imagem de micro-ondas (SI-MWR) a bordo dos satélites de Deteção Remota, divulgados pelo NOAA class: produtos AMSU swath dos sensores NOAA-15, -18, -19, MetOp-A, MetOp-B; e divulgados pelo Remote Sensing Systems (RSS): produtos grelha dos sensores



- AMSR-E do Aqua, AMSR-E do GCOM-W1, TMI do TRMM, SSMI/S do F16, F17 e F18, Windsat do Coriolis e GMI do GPM. Utilizando estes produtos a WTC é calculada através da expressão de Stum et al. (2011) (ver Fernandes et al., 2013b).
- Produtos de atraso troposférico zenital (ZTD, *Zenith Total Delay*) de mais de 800 estações (ver na Figura 1 a localização das estações), pertencentes às redes de estações GNSS IGS (*International GNSS Service*); EPN (*EUREF Permanent Network*) e SuomiNet. Apenas as estações que distem até 100 km da costa e com uma altitude ortométrica inferior a 1000 m são consideradas. No tratamento dos dados, é necessário ter em conta que os ZTD são fornecidos ao nível da estação e que a medida de interesse é o atraso troposférico devido à componente húmida da troposfera ou ZWD (*Zenith Wet Delay*), ao nível do mar. Para tal, são utilizadas as expressões de cálculo do atraso devido à componente hidrostática (ZHD, *Zenith Hydrostatic Delay*) (Davis et al., 1985) e de redução da altitude (Kouba, 2008), descritas em Fernandes e Lázaro (2016).

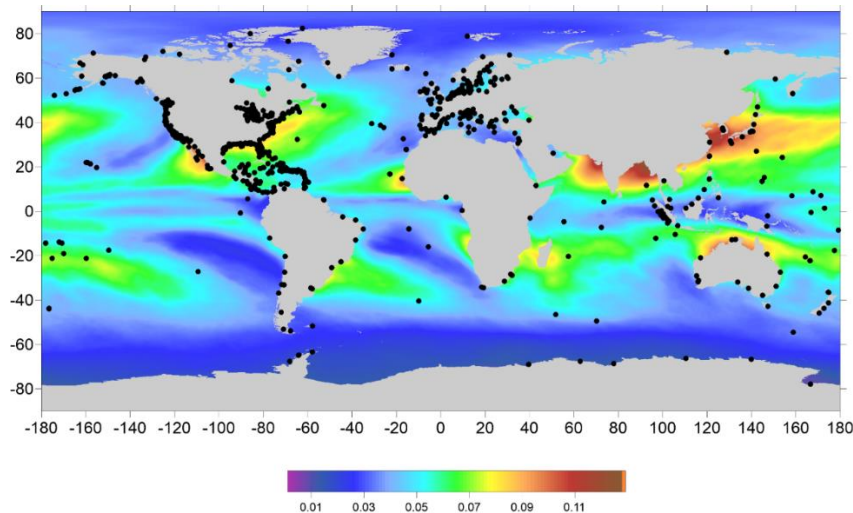


Figura 1 – Localização das estações GNSS utilizadas no algoritmo GPD+. A imagem de fundo representa o mapa do desvio-padrão da WTC, em metros, calculada usando um período de dois anos do modelo ECMWF

- Modelo ECMWF operacional, por possuir uma resolução espacial elevada ($0.125^\circ \times 0.125^\circ$), ser fornecido de 6 em 6 horas (Miller et al., 2010) e divulgado com uma cadência inferior a 2 dias: é utilizado no cálculo regular do GPD+ tanto no fornecimento operacional do Cryosat, como no cálculo regular para os produtos do RADS dos satélites mais recentes. Para as missões com dados anteriores a 2004, é usado o modelo ERA Interim (Dee et al., 2011), por ser mais preciso que o modelo operacional no período anterior a esta data (Fernandes et al., 2014). São utilizados três parâmetros atmosféricos do modelo ECMWF no cálculo da WTC: pressão do nível do mar (SLP, *Sea Level Pressure*); temperatura atmosférica da superfície (T2m, *2-meter Temperature*); vapor de água integrado (TCWV, *Total Column Water Vapour*). Esta WTC é calculada por interpolação no espaço e no tempo, utilizando as duas grelhas de 6 horas do modelo mais próximas e consecutivas do ponto de passagem. Estes parâmetros são ainda utilizados para o cálculo do ZWD a partir do ZTD obtido por GNSS.

3. Automatização do processo de cálculo

3.1 Fornecimento Operacional do GPD+ para a missão Cryosat-2.

Até ao compromisso do fornecimento operacional para o projeto Cryosat, as etapas envolvidas na criação do produto GPD+ não estavam interligadas e eram realizadas manualmente por um operador. Assim, acumulavam-se grandes volumes de dados para processar, tornando-se numa tarefa morosa. Para que o fornecimento operacional fosse realizado com sucesso, com o mínimo de falhas possível e com o mínimo de intervenção humana, foi necessário automatizar todos os procedimentos envolvidos na criação e fornecimento do GPD+, de forma a que o processamento fosse efetuado todos os dias.

A Figura 2 ilustra a sequência de operações do algoritmo, permitindo identificar todas as etapas envolvidas. Assim, foram identificadas 5 etapas principais, que serão descritas posteriormente: 1) *Download* dos Dados; 2) Tratamento e análise dos dados; 3) Cálculo da correção GPD+; 4) Validação da correção; 5) Envio da correção.

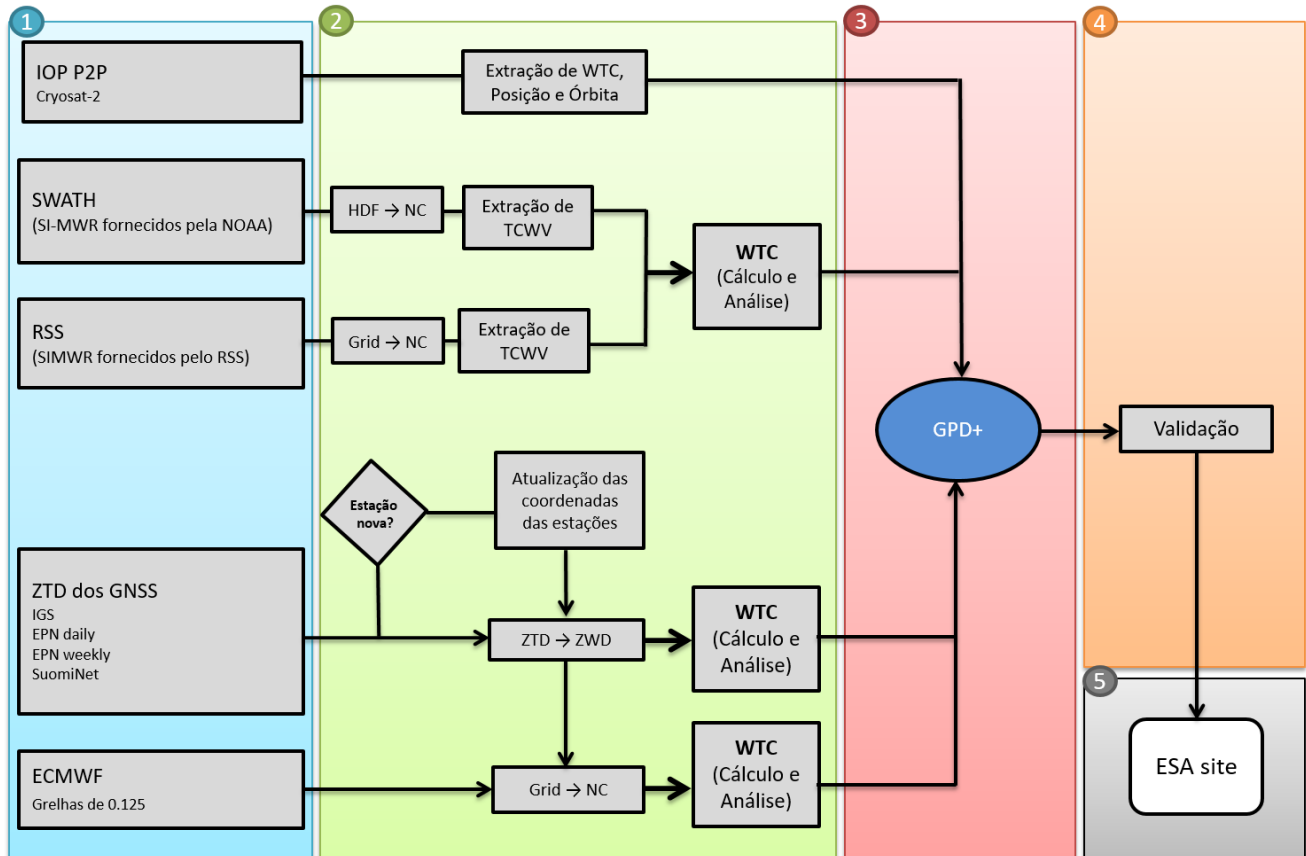


Figura 2 – Esquema do processo de automatização para o fornecimento operacional do GPD+ para a ESA

3.1.1 – Download dos Dados

Os dados de *input* para o algoritmo GPD descritos na secção anterior são descarregados de centros diferentes e em formatos diferentes:

- Os produtos SWATH são dados SI-MWR fornecidos em formato HDF-EOS;
- Os produtos RSS são dados SI-MWR fornecidos sob a forma de grelha, em formato binário;
- Os produtos ZTD dos GNSS são divulgados por 3 centros diferentes (IGS, SuomiNet e EPN), em formato ASCII;
- Os produtos TCWV, T2m e SLP do modelo ECMWF operacional são fornecidos sob a forma de grelha, em formato netCDF, sendo disponibilizadas 4 grelhas por dia (6 em 6 horas).
- É necessário considerar também o *download* dos dados do CS-2, contendo a localização e época das medidas, para as quais serão calculadas as correções GPD+. No caso do fornecimento operacional, são utilizados os dados IOP P2P divulgados pela ESA, em formato netCDF. Estes produtos são de nível 2 (L2) e contêm dados referentes aos modos LRM, SAR e SARin, com a cobertura correspondente a meia órbita.

No Quadro 1 é possível observar com que atraso se pode obter cada um dos produtos de *input* do GPD.

Quadro 1 – Produtos que são descarregados e o atraso correspondente com que se podem obter

Produto	Atraso máximo em dias
IGS	21-24
EPN daily	15-20
EPN weekly	45-50
SuomiNet	1-3
ECMWF	1-2
SWATH	1-2
RSS	1-3
Windsat_rt	1-3
Windsat_v7	31-35
IOP P2P	2-5

A automatização do *download* dos dados foi possível com a implementação de um programa capaz de realizar a conexão entre o computador da FCUP que serve de suporte a todo o cálculo e fornecimento da correção, com os diferentes servidores dos centros que disponibilizam os vários produtos utilizados. Foi ainda necessário ter em atenção que cada produto é descarregado por um método diferente e que o responsável pela monitorização do processamento deve estar atento a eventuais alterações da parte dos servidores que os fornecem.

Os dados são descarregados diariamente e, com base no atraso previsto dos dados (ver Quadro 1), definiu-se que os produtos IOP P2P, SWATH, RSS, ECMWF, SUO e Windsat_rt são descarregados com um atraso de 5 dias, sendo os restantes descarregados sempre que existam no servidor. Para tal, o programa realiza uma verificação ao servidor todos os dias.

Com base no atraso máximo com que são disponibilizados os dados, a FCUP comprometeu-se a fornecer os ficheiros diários do GPD+ com uma latência de 28 dias, assegurando assim que o cálculo é efetuado com o máximo de produtos disponíveis. Desta forma, o cálculo é efetuado quando os dados do IGS estão disponíveis, sendo nos dias seguintes efetuada a verificação e análise do produto GPD+ criado.

3.1.2 – Tratamento e Análise dos dados

A segunda etapa, representada na Figura 2 a verde claro, consiste na preparação dos dados de *input* para o GPD. Por exemplo:

- Todos os dados de TCWV (SWATH e RSS) são convertidos em formato netCDF de forma a uniformizar os dados. A conversão para netCDF justifica-se, uma vez que o processamento é mais rápido do que utilizando o formato original dos ficheiros (ASCII ou binário).
- São calculados produtos ZWD (equivalente à WTC) a partir dos produtos ZTD dos GNSS e do ZHD calculado utilizando o campo SLP do modelo ECMWF; posteriormente, são convertidos em formato netCDF.
- São extraídos os campos necessários para a criação do GPD+ (posição, tempo, órbita, entre outros) dos ficheiros IOP P2P, e criados os ficheiros diários com o formato especificado pela ESA (com uma determinada percentagem de sobreposição de dados no início e final de cada dia).

É importante realizar a verificação dos ficheiros de *input* para confirmar que entram no algoritmo GPD+ todos os dados disponíveis, assegurando, por exemplo, que não ficam dias por descarregar ou por converter para netCDF.

3.1.3 – Cálculo da correção GPD+

No âmbito do projeto Cryosat, o cálculo do GPD+ é realizado para o tempo e posição de passagem do satélite CS-2 presentes nos dados IOP P2P fornecidos pela ESA. A descrição detalhada do cálculo foi apresentada na secção 2.

3.1.4 – Validação da correção

A validação do produto GPD+ é realizada utilizando medidas estatísticas de médias de diferenças entre o GPD+ e o modelo ECMWF para os pontos ao longo do traço do satélite identificados, de acordo com a orografia do modelo, como “mar”. É ainda verificado o número de pontos SI-MWR e GNSS utilizados no cálculo. Caso se verifique alguma anomalia, é necessário verificar em que etapa do processo o operador deve intervir, sendo necessário calcular novamente a correção GPD+ para o dia ou dias em que se verificou a anomalia.

3.1.5 – Envio da correção

Todos os dias está agendado no servidor da FCUP o envio automático do ficheiro GPD+ correspondente ao 28º dia anterior ao dia em questão, seguindo todas as instruções acordadas entre a FCUP e a ESA. O envio fica registado em *cache* de forma a que seja possível a verificação diária do envio operacional da correção.

3.2 Cálculo Automático do GPD+ para as missões disponíveis no RADS

A equipa da FCUP comprometeu-se a fornecer o produto GPD+ para divulgação na página do CTOH, instituição que disponibiliza um conjunto de dados altimétricos para aplicações costeiras, e, para isso, o GPD+ foi calculado para as várias missões altimétricas desde 1991 até ao final de 2017 de forma não automática. Recentemente, aproveitando a automatização do cálculo do GPD+ para o Cryosat, foram também automatizados os procedimentos relativos ao cálculo dos produtos GPD+ divulgados no CTOH.

À exceção de missões cujos dados tenham sido reprocessados e não estejam ainda disponíveis no RADS, como foi o caso recente do Envisat, são utilizados os dados das missões altimétricas fornecidos pelo RADS, uma vez que esta é a base de dados de produtos altimétricos mais completa disponível no momento (Scharroo et al., 2012), o que facilita a extração dos vários campos necessários para o cálculo da WTC e para a validação da mesma.

O campo de maior relevância a ser extraído é a WTC do radiómetro a bordo do satélite (*wet_tropo_rad*) que no caso do satélite CS-2 não existe, e por isso, para esta missão é utilizado apenas o campo da WTC proveniente do modelo (*wtc_tropo_ecmwf*). Até ao final do ano 2017, foram calculados produtos GPD+ para as missões altimétricas ERS-1, ERS-2, Envisat, GFO, TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, CryoSat-2 e SARAL/AltiKa..

Atualmente, de forma automática estão a ser calculados os produtos para os satélites Jason-2, Jason-3 e Cryosat-2, prevendo-se para breve a inclusão do Sentinel-3A. Tendo em conta que neste caso são criados ficheiros de ciclo, com uma latência de 45 a 50 dias, são criados 2 a 3 ciclos de GPD+ para o Jason-2 e para o Jason-3, e 1 ciclo para o Cryosat-2, assegurando assim que os ficheiros de ciclo estão completos e com os produtos mais estáveis (EPN *weekly* e Windsat_v7).

As etapas envolvidas neste processo são semelhantes às identificadas na Figura 2. No entanto, os programas são adaptados aos produtos RADS. Na etapa de validação, a medida SLA disponibilizada pelo RADS é utilizada para efetuar procedimentos de validação usando parâmetros estatísticos de variância da SLA calculada usando diferentes WTC (GPD+, MWR, modelo, etc.), como descrito, por exemplo, em Fernandes e Lázaro (2016).

Após a validação dos produtos GPD+, estes estão prontos a ser enviados para o servidor do CTOH e a serem publicados na página oficial da equipa de altimetria por satélite da FCUP.

4. Conclusões

Há vários anos que a equipa de altimetria por satélite da FCUP tem participado em projetos internacionais apoiados pela ESA. O mais recente projeto “Cryosat” motivou a equipa para desenvolver a automatização dos processos envolvidos na criação do produto GPD+, possibilitando uma evolução na metodologia de trabalho e demonstrando a capacidade da equipa em se adaptar à evolução científica.

Neste momento, qualquer utilizador com interesse na investigação do domínio da Deteção Remota aplicada ao Oceano e em particular em zonas costeiras, tem acesso às correções GPD+ para obter melhor precisão na WTC, através dos produtos GOP P2P do Cryosat-2 divulgados pela ESA, dos produtos altimétricos costeiros divulgados na página do CTOH e na página da equipa de Altimetria por Satélite da FCUP (www.fc.up.pt/Satellite_Altimetry/).

A equipa continua em constante evolução, e espera-se que em trabalhos futuros o GPD+ seja melhorado, por exemplo, para os pontos de passagem em “terra”.

Referências Bibliográficas

- Bretherton, F.P., Davis, R.E., Fandry, C.B. (1976). A technique for objective analysis and design of oceanographic experiment applied to MODE-73. *Deep-Sea Research*, 23, 559–582.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593–1607.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553–597.
- Desportes, C., Obligis, E., Eymard, L. (2007). On the wet tropospheric correction for altimetry in coastal regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 2139–2149.
- Fernandes, M., & Lázaro, C. (2016). GPD Wet Tropospheric Corrections for CryoSat-2 and GFO Altimetry Missions. *Remote Sensing*, 8(10), 851. doi:10.3390/rs8100851
- Fernandes, M.J., Lázaro, C., Ablain, M., Pires, N. (2015). Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions. *Remote Sensing of Environment*. 169 50–74.
- Fernandes, M.J., Lazaro, C., Nunes, A.L., Pires, N., Bastos, L., Mendes, V.B. (2010). GNSS derived path delay: An approach to compute the wet tropospheric correction for coastal altimetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7, 596–600.
- Fernandes, M.J., Lázaro, C., Nunes, A.L., Scharroo, R. (2014). Atmospheric corrections for altimetry studies over inland water. *Remote Sensing*, 6, 4952–4997.
- Fernandes, M.J., Nunes, A.L., Lázaro, C. (2013a). Analysis and inter-calibration of wet path delay datasets to compute the wet tropospheric correction for CryoSat-2 over ocean. *Remote Sensing*, 5, 4977–5005.
- Fernandes, M.J., Pires, N., Lázaro, C., Nunes, A.L. (2013b). Tropospheric delays from GNSS for application in coastal altimetry. *Advances in Space Research*, 51.
- Kouba, J. (2008). Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1). *Journal of Geodesy*, 82, 193–205. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-007-0170-0>.
- Miller, M., Buizza, R., Haseler, J., Hortal, M., Janssen, P., Untch, A. (2010). Increased resolution in the ECMWF deterministic and ensemble prediction systems. *ECMWF Newsletter*, 124, 10–16.
- Scharroo, R., Leuliette, E.W., Lillibridge, J.L., Byrne, D., Naeije, M.C., Mitchum, G.T. (2012). RADS: Consistent multi-mission products. *Proceedings of symposium on 20 years of progress in radar altimetry Venice, Italy*.
- Stum, J., Sicard, P., Carrere, L., Lambin, J. (2011). Using objective analysis of scanning radiometer measurements to compute the water vapor path delay for Altimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 3211–3224.