



HAL
open science

Apport de l'interférométrie radar satellitaire pour le suivi des évolutions environnementales en Amazonie, Brésil

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos

► **To cite this version:**

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos. Apport de l'interférométrie radar satellitaire pour le suivi des évolutions environnementales en Amazonie, Brésil. Sciences de la Terre. Université de Grenoble; Universidade federal do Rio de Janeiro, 2013. Français. NNT : 2013GRENA019 . tel-01069825

HAL Id: tel-01069825

<https://theses.hal.science/tel-01069825>

Submitted on 30 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

préparée dans le cadre d'une cotutelle entre
*l'Université de Grenoble et l'Université Fédérale de
Rio de Janeiro*

Spécialité : **Sciences Terre, Univers et Environnement**

Arrêté ministériel : le 6 janvier 2005 -7 août 2006

Présentée par

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos

Thèse dirigée par **Emmanuel Trouvé** et **Alexandre G. Evsukoff**
codirigée par **Fernando Pellon de Miranda**

préparée au sein des **Laboratoires LISTIC et LabSAR**

dans les **Écoles Doctorales SISEO et PEC/COPPE/UFRJ**

Apport de l'interférométrie radar satellitaire pour le suivi des évolutions environnementales en Amazonie, Brésil.

Thèse soutenue publiquement le **27 de septembre 2013**,
devant le jury composé de:

M. Nelson, Francisco Favilla Ebecken

Professeur, Université Fédérale de Rio de Janeiro, COPPE, Président

M. Laurent, Polidori

Directeur de l'ESGT, Professeur CNAM, Rapporteur

M. Pedro, Walfir Martins e Souza Filho

Professeur, Université Fédérale de Pará, Rapporteur

M. Emmanuel, Trouvé

Professeur, Université de Savoie, LISTIC, Directeur

M. Alexandre, G. Evsukoff

Professeur, Université Fédérale de Rio de Janeiro, COPPE, Co-directeur

M. Fernando, Pellon de Miranda

Professeur, Université Fédérale de Rio de Janeiro, COPPE, Co-directeur

*Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP*



Résumé étendu en Français
Resumo expandido em Francês

Résumé

Pendant ces dix dernières années, les lancements successifs de satellites pour l'observation de la Terre dotés de capteurs SAR (*Synthetic Aperture Radar*) ont permis de montrer son fort potentiel, car ces systèmes sont capables de couvrir de vastes régions avec une résolution élevée, ce qui représente un avantage pour le suivi terrain. La masse de données générée a permis le développement de l'interférométrie radar et son application à l'étude de faibles déformations en zone urbaine ou dans les zones de failles, prouvant que la technique permettait de s'intéresser à différentes échelles spatiales de déformation, ainsi qu'à des échelles temporelles allant de quelques semaines à plus de dix ans. Habituellement, ces types d'applications ont été limités à des régions non équatoriales du globe en raison de la présence de perturbations atmosphériques qui affectent le signal radar. Compte tenu de la grande taille et la localisation isolée des grands bassins tropicaux comme l'Amazonie, les observations par satellite restent comme une approche viable pour valider des modèles géophysiques existants. Dans cette optique, cette thèse propose d'élargir les applications conventionnelles, en s'occupant d'investiguer le potentiel et les limites de l'interférométrie SAR pour la mesure de la déformation du terrain dans la région amazonienne, qui n'a pas encore été étudiée dans ce cadre spécifique.

L'application consiste à estimer le déplacement de la surface de la Terre sur la zone urbaine de Manaus, la plus grande ville de l'État d'Amazonas au Brésil, qui représente un site important pour l'exploration pétrolière et gazière et pour le transport. Ce site est entouré par des écosystèmes fragiles, qui le rendent très sensible à la présence de l'industrie pétrolière. Dans ce contexte, une compréhension de la dynamique temporelle et de la distribution spatiale des phénomènes de néotectonique est fondamentale pour la définition de bonnes pratiques de gestion de l'environnement.

Au niveau méthodologique, afin de lever les principales difficultés rencontrées pour l'application de l'interférométrie différentielle sur une pile de données Radarsat-1, une stratégie multi-échelles et "model free", basée sur l'information de déformation non-linéaire au cours du temps est adoptée avec succès. La caractéristique essentielle de cette procédure est la séparation du signal de phase en différentes échelles de contributions spatiales pour simplifier la séparation des trois composantes de phase (topographie, atmosphère et déplacement). Cela conduit à une plus grande robustesse et permet l'inversion de composantes de phase pour les petites piles des images.

Au niveau géophysique, l'application de l'interférométrie à l'étude du déplacement du terrain est réalisée pour la première fois sur le milieu de l'Amazonie, en complétant les études de géologie structurale antérieures basées sur les mesures issues de la corrélation des images optiques et les mesures de terrain. En complément des connaissances antérieures, la présente étude apporte une information précise sur l'hypothèse de mouvements de la croûte récents liés aux activités néotectoniques du bassin de l'Amazonie. Les résultats indiquent une zone de mouvement de la croûte adjacente à une structure de drainage circulaire dans la ville de Manaus. Les images Radarsat-1 et 2 acquises sur cette région apportent une meilleure compréhension des activités géologiques et du mouvement de la croûte dans le bassin de l'Amazonie.

Abstract

During the past decade, successive satellites launches for Earth observation with SAR (Synthetic Aperture Radar) sensors onboard have shown its potential, since these systems are able to cover large areas with high resolution, which represents an advantage for surface monitoring. The mass of data generated has enabled the development of radar interferometry and its application to the study of small deformations in urban areas or in fault zones, showing that the technique was able to focus on different spatial scales of deformation, as well as temporal scales ranging from a few weeks to more than a decade. Usually, these types of applications have been limited to non-equatorial regions of the world due to the presence of atmospheric disturbances that affect the radar signal. Given the large size and the remote location of tropical basins such as the Amazon, satellite observations remain as a viable approach to validate existing geophysical models. In this context, this thesis proposes to extend conventional applications, taking care to investigate the potential and limitations of SAR interferometry for the measurement of ground deformation in the Amazon region, not yet studied in this specific context.

The research aim is to estimate the displacement at the surface of the Earth on the urban area of Manaus, the largest city in the state of Amazonas in Brazil, which is an important site for oil and gas exploration and the transport. This site is surrounded by fragile ecosystems, which make it very sensitive to the presence of the oil industry. Considering this, an understanding of the temporal dynamics and spatial distribution of neotectonic phenomena is fundamental to the development of best practice environmental management.

At the methodological level, to overcome the major challenges of the application of differential interferometry on a Radarsat-1 time series, a multi-scale and "model free" strategy, based on the information of a non-linear deformation over time is passed successfully. The essential feature of this process is the separation of the phase signal into small and large scale spatial contributions to simplify the separation of the three phase components (topography, atmosphere and movement). This leads to a more robust processing and allows the phase component inversion for small piles of images.

At the geophysical level, the application of interferometry to investigate the ground movement is performed for the first time in the middle of the Amazon, complementing previous studies of structural geology based on measurements from the correlation of optical

images and field measurements. In addition to prior knowledge, this study provides accurate information on the hypothesis of recent crustal movements associated with neotectonic activities of the Amazon basin. The results indicate a range of motion of the adjacent crust structure circular drainage in the city of Manaus. The Radarsat-1 and Radarsat-2 images acquired in this region provide a better understanding of geological activity and crustal movement in the Amazon basin.

Remerciement

Les travaux de cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire du LISTIC à l'Université de Savoie et au LabSAR à l'Université Fédérale de Rio de Janeiro. Je remercie donc ces deux laboratoires m'ayant accueilli dans leurs locaux. Une partie du traitement des données a été réalisé à Vancouver dans l'entreprise 3vGeomatics que je souhaite aussi remercier pour la collaboration.

Je tiens à remercier les membres de jury, Pedro Walfir, Laurent Polidori et Nelson Ebecken d'avoir accepté mon invitation et pour le temps consacré à mon manuscrit et la soutenance et en particulier mes encadrants Alexandre, Emmanuel et Fernando. Grâce à leurs connaissances et compétences, j'ai pu avancer les travaux de cette thèse.

Je voudrais aussi exprimer mes remerciements aux collaborateurs de 3vGeomatics Adrian McCardle et Parwant Ghuman, grâce à qui certaines parties des travaux ont été mises en place.

Du côté personnel, je voudrais remercier mes parents, les vieux amis brésiliens qui sont toujours là et les nouveaux amis qui j'ai connu en France et au Canada pour leurs soutiens pendant ces années.

Table des matières

1 Introduction	9
1.1 Contexte, problématique et objectif	9
1.2 Positionnement des travaux	10
1.3 Organisation du document	10
2 Systèmes SAR et interférométrie radar : principes généraux.....	12
2.1 Historique et généralités autour de l'interférométrie et de son développement	12
2.1.1 Surveillance de déplacement de terrain en milieu urbain.....	13
2.2 Notions de base du Système SAR.....	14
2.2.1 Géométrie SAR.....	14
2.2.2 Résolution en distance.....	16
2.2.3 Résolution en azimut	16
2.2.4 Caractéristiques des images SAR	17
2.2.5 La phase interférométrique	17
2.2.6 Géométrie InSAR.....	19
2.2.7 Interférométrie différentielle (DInSAR) et l'approche PSInSAR	20
3 DInSAR appliqué aux données Radarsat-1 sur la ville de Manaus : la chaîne de traitement et résultats	22
3.1 Description des étapes de traitement DInSAR Radarsat-1	22
3.1.1 Recalage et formation d'interférogramme.....	23
3.1.2 Analyse des couples : <i>baseline</i> cohérence et phase,	25
3.1.3 Réduction d'échelle ou <i>Multilooking</i>	28
3.1.4 Simulation et soustraction des franges.....	30
3.1.5 Filtrage	32
3.1.6 Estimation de fréquences locales	32
3.1.7 Déroulement de phase	33
3.2 Résultats obtenus	36
3.2.1 Analyse statistique du motif AMC.....	39
3.2.2 Discussion finale et perspectives	42
4 PTI (<i>Point Target</i> InSAR) appliqué sur les données Radarsat-2 : l'approche <i>Dual-Scale Network Analysis</i> et ses résultats	44
4.1 Identification des cibles stables (<i>Point Targets</i>) en imagerie SAR	44
4.2 Concepts et étapes du traitement <i>Dual-Scale Network Analysis</i>	46
4.2.1 Réseau InSAR (<i>Network InSAR</i>)	47
4.2.2 <i>Dual-Scale Network Analysis</i>	48
Traitement 2D <i>Stack</i>	51
Reconnaissance des zones de déplacement	51
<i>Point Target Network Analysis</i>	51
Déroulement de phase 3D	52
4.3 Résultats.....	53
4.3.1 Données initiales, recalage et <i>geocoding</i>	55
4.3.2 Correction de ligne de base géométrique (<i>baseline</i>).....	57
4.3.3 Suppression de la phase atmosphérique à longue échelle.....	59

4.3.4 Inversion du réseau.....	60
4.3.5 Détection de mouvement.....	61
4.3.6 L'analyse Point Target InSAR	63
4.3.7 Discussion finale et perspectives	67
5 Conclusion générale et perspectives	68
5.1 Principaux résultats.....	68
5.2 Contributions	69
5.2.1 Traitement de l'information	69
5.2.2 Géologie	70
5.3 Perspectives	70
Liste de Figures	72
Liste de Tableaux.....	74
Bibliographie	75

Liste des acronymes et notations

CAPES : Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CNPQ : Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

COPPE : Instituto Alberto Luiz Coimbra de pós-graduação e pesquisa de Engenharia

EFIDIR : Extraction et Fusion d'Informations pour la mesure de Déplacements par Imagerie Radar

ERS-1/2 : European Remote Sensing – satellites de l'ESA

ESA : European Space Agency

GPS : Global Positioning System

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar

LISTIC : Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance

LOS : line of sight

MCF : Minimum Cost Flow

MNT : Modèle Numérique du Terrain

MUSIC : Multiple Signal Classification

PS : Permanent Scatterer

RDC : Range Doppler Coordinates

RMS : Root Mean Square

SAR : Synthetic Aperture Radar

SBAS : Small Baseline Subset

SLC : Single Look Complex

SNAPHU : Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

UFRJ : Universidade Federal do Rio de Janeiro

1 Introduction

1.1 Contexte, problématique et objectif

Le suivi par télédétection aux frontières d'exploration du bassin Amazonien a commencé dans la fin des années 1980. Ces études combinent des données spatiales différentes et de l'information géophysique, notamment pour la génération de cartes, la détection des changements de la couverture forestière et la surveillance des inondations de ses grands fleuves. Plus récemment, les informations de cohérence de phase se sont montrées plus efficace que la rétrodiffusion radar pour la différenciation des arbres et l'estimation de volume. Cependant, le potentiel et les limites de l'interférométrie spatiale pour la mesure de la déformation dans la région amazonienne n'ont pas encore été étudiés.

Manaus est une ville en pleine expansion de 1,8 million d'habitants, située à la confluence des grands fleuves Negro et Amazonas. L'étude InSAR peut fournir une meilleure compréhension de la dynamique temporelle et la répartition spatiale de la déformation du terrain dans la région, permettant des connexions possibles avec les événements néotectoniques.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de caractériser le mouvement récent de la croûte à Manaus, en complément de l'étude réalisée par (Bevis, Alsdorf et al. 2005), qui a révélé un cycle annuel de déplacement vertical dans ce domaine avec une amplitude de 50-75 mm, mesurée à l'aide d'une station GPS. Ceci est considéré comme une grande oscillation de la croûte et indique que la lithosphère est susceptible de s'affaisser et de rebondir en réponse à des changements dans le poids de la colonne d'eau.

Dans l'intention de contribuer à la connaissance InSAR orbitale sur la région de l'Amazonie, nous avons fait premièrement une étude avec les données Radarsat-1 (Ramos, Miranda et al. 2012), puis une deuxième investigation en appliquant la méthode de réseau *Dual-Scale* (Rabus and Ghuman 2009) sur une pile de données Radarsat-2, et finalement une analyse de l'ensemble des résultats pour déterminer le mouvement du sol avec moins de bruit et une plus grande fiabilité statistique. Ces résultats confirment le taux de déplacement à l'intérieur de la zone urbaine de Manaus au centre de la région amazonienne.

1.2 Positionnement des travaux

L'encadrement de cette thèse en cotutelle est mis en œuvre dans le cadre du projet de coopération Brésil – France CAPES COFECUB (Comité Français d'Evaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil) signé en 1979, avec le but de pérenniser les échanges de haut niveau au travers d'un accord-cadre de coopération inter-universitaire dans lequel les partenaires institutionnels du programme sont, pour le Brésil, la CAPES (coordination pour le perfectionnement du personnel de l'enseignement supérieur, agence qui dépend du ministère de l'éducation) ; pour la France, le ministère des Affaires étrangères et européennes et le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Dans ce sujet de thèse, collaborent l'Université Fédérale de Rio de Janeiro et l'Université de Savoie représentés par les deux laboratoires COPPE et LISTIC.

Dans cette thèse, nous avons utilisés conjointement les connaissances de 2 domaines : la télédétection, plus spécifiquement les données SAR, et la géophysique, plus spécifiquement la géologie et géomorphologie. Les travaux principaux consistent à traiter un grand volume de données SAR obtenu en télédétection pour mesurer le champ de déplacement en surface de la Terre et caractériser la source du déplacement à travers l'information géologique.

Pour la communauté de la télédétection, ces travaux ont pour objectif d'extraire les déplacements à partir des données SAR brutes en développant des chaînes de traitement basées sur la technique de l'interférométrie différentielle, surtout au niveau de l'application, car nous nous plaçons dans l'Amazonie brésilienne. Il est important de mentionner que dans la communauté brésilienne de télédétection, l'interférométrie spatiale n'est pas très diffusée, comme on peut observer sur la plus grande conférence de Télédétection organisée par INPE (Institut National de Recherche Spatial) dans les dernières années 2011 et 2013 où moins que 5 articles ont été publiés sur ce thème parmi 1200 travaux.

1.3 Organisation du document

Ce mémoire se présente en trois parties principales. La première partie constitue une synthèse bibliographique de l'état de l'art sur le domaine de la télédétection, spécifiquement basée sur les capteurs radar. Nous présentons l'historique, les principes généraux et les notions de base sur les systèmes SAR et la technique InSAR.

Les chapitres 3 et 4 montrent, respectivement, l'application des deux principales approches méthodologiques : DInSAR (Interférométrie différentielle) et PTI (*Point Target InSAR*) sur les données des satellites Radarsat-1 et Radarsat-2 pour extraire la mesure de déplacement dans la ville de Manaus au Brésil.

Dans la troisième partie, représentée par le chapitre finale, nous présentons des conclusions et perspectives des travaux.

2 Systèmes SAR et interférométrie radar : principes généraux

Ce chapitre présente l'histoire de la technologie radar satellitaire et les notions de base pour la compréhension de la méthodologie appliquée et des résultats obtenus dans cette recherche. Il rassemble aussi les principales références bibliographiques en lien avec les thèmes abordés.

2.1 Historique et généralités autour de l'interférométrie et de son développement

Le lancement du satellite européen ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*) en 1991 a marqué le début de l'évolution des techniques et applications de l'interférométrie radar (InSAR). Les recherches menées durant les années 90 peuvent être regroupées en trois grandes catégories : la cartographie des déformations de la surface de la terre, la génération de Modèles Numériques de Terrain, et la caractérisation des changements généraux du terrain. Initialement, la technologie a été appliquée avec succès dans la cartographie de déformation de la surface de la terre lors d'éruptions volcaniques et de tremblements de terre. Ces études ont fourni des informations pertinentes sur la dynamique du magma et une meilleure compréhension de la distribution et de la rupture des dépôts de sédiments associés à des événements sismiques (Wright, Parsons et al. 2001). A la fin de les années 90, les études de subsidence de terrain, d'élévation associée à l'extraction et l'injection de fluides dans les aquifères souterrains et d'exploration pétrolière, ont montré que l'utilisation des données générées par interférométrie fournissent des informations importantes pour atténuer les risques liés à ces activités. En outre, la technologie InSAR s'est avérée être un moyen efficace pour détecter les mouvements de masse lente, devenant la référence pour le suivi de mouvements gravitaires. Une de ses grandes contributions est l'acquisition régulière d'images sur les zones de hautes latitudes, comme l'Arctique, l'Antarctique et la Groenland, qui a permis une meilleure connaissance sur le comportement des glaciers et leur rapport au réchauffement climatique. Cette technologie (en particulier en utilisant des systèmes SAR avec des plus longues longueurs d'onde) est encore utilisée dans la cartographie des zones inondées, où il est possible de mesurer avec précision la différence de niveau d'eau aidant de cette façon, la modélisation des systèmes hydrologiques (Lu, Wicks et al. 2003). La construction de modèles numériques de terrain (MNT) en utilisant l'interférométrie SAR s'est développée sur les zones où le suivi par photogrammétrie a été inadéquat en raison de conditions climatiques locales. Il convient de mentionner son utilisation dans la cartographie topographique des glaciers sur la surface, la détermination

de la magnitude et la direction des forces gravitationnelles qui alimentent la dynamique de la glace. La mission SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA, qui a conduit à un MNT qui couvre environ 80% de la superficie de la Terre (Rabus, Eineder et al. 2003) et aujourd'hui la mission TanDEM-X qui construit un MNT mondiale par InSAR satellitaire bistatique, constituent les meilleurs exemples de cette application.

Dans ces dernières années, la cartographie de déformation de la surface de la terre a progressé, permettant le développement de nouvelles méthodologies pour la surveillance des risques géotechniques pour les oléoducs et gazoducs qui traversent de grandes étendues territoriales écologiquement complexes. Le défi actuel est de réduire les erreurs causées par des anomalies atmosphériques (principalement dans les régions tropicales), par les imprécisions sur les orbites du satellite et par la perte de cohérence, afin d'augmenter la précision de mesure de déformation des sols.

Dans les années à venir il y aura une série d'innovations scientifiques et techniques dans des nombreux aspects de la technologie InSAR, compte tenu du grand nombre de satellites avec des capteurs SAR récemment introduit, comme RADARSAT-2, ALOS, TerraSAR-X, CosmoSkymed entre autres. En plus de leur plus grande couverture temporelle, ces nouvelles missions orbitales assurent la continuité des précédentes et étendent leurs applications grâce à l'utilisation de longueurs d'onde différentes (bandes C, L et X, respectivement) et aux données polarimétriques (PolSAR). Ces dernières, combinées à l'analyse par interférométrie, c'est à dire l'interférométrie polarimétrique (Pol-InSAR), permet l'amélioration de l'identification des structures de cibles et la caractérisation de l'ensemble de la surface, ce qui augmente la possibilité d'utiliser les applications mentionnées précédemment. Les principales applications PolSAR sont la surveillance de cultures agricoles et différents types de végétation (Vasile 2007) et la détection des changements en différents milieux comme les glaciers et les villes urbaines.

En particulier, le lancement du premier satellite de la nouvelle génération Sentinel prévu pour 2013, va fournir un grand nombre de données SAR gratuitement. De ce fait, l'imagerie SAR fournit régulièrement des mesures de déplacement sur de grandes superficies qui couvrent le monde entier.

2.1.1 Surveillance de déplacement de terrain en milieu urbain

Certaines des principales études interférométriques sur la subsidence de terrain sur les zones urbaines ont été faites par les auteurs suivants: Santoro et al. (1999), Berardino et al. (2000), Ferretti et al. (2001), Racoules et al. (2003), Worawattanamateekul et al. (2003),

Liao et al. (2005), Schneider et al. (2006), Remy et al. (2007), Gehlot et Hanssen (2008) , Fornaro et al. (2009), (Yan, Doin et al. 2012).

Ces articles apportent des propositions méthodologiques appliquées dans les zones urbaines telles que Naples et Milan (Italie), Bangkok (Thaïlande), Los Angeles (USA), Paris (France), Shanghai (Chine), Rotterdam (Pays-Bas), et Mexico city, entre autres. Ces publications traitent de l'utilisation des méthodes DInSAR et PSInSAR d'un grand nombre d'images acquises sur plusieurs années. Cette base de données fournit des résultats plus fiables, souvent avec succès par rapport aux données provenant d'enquêtes sur le terrain avec des équipements traditionnels. Des études basées en Europe, notamment en Italie, sont fortement axées sur une échelle locale, où la préoccupation est d'identifier l'affaissement de la terre sous les bâtiments qui ont normalement déjà quelques fissures dans leurs structures. Dans le cas de Los Angeles (États Unis), par exemple, il est possible d'observer une subsidence de terrain de 5 mm d'une zone proche des failles qui contrôle la structure des champs de pétrole et de gaz, en utilisant 56 images des satellites ERS-1 et 2, entre 1992 et 1999 (Bawden, Thatcher et al. 2001).

Les techniques classiques géodésiques comme le nivellement et les systèmes de positionnement GPS, sont considérées comme moins riches pour la surveillance de la déformation progressive de la surface, car elles sont limitées dans le temps et l'espace. L'analyse par télédétection a des avantages en termes de coût, de couverture spatiale, d'accessibilité et de disponibilité des données historiques (Fornaro, Pauciuolo et al. 2009). Gehlot & Hanssen (2008) suggèrent comme nécessaire l'intégration des résultats obtenus par l'interférométrie et les systèmes d'information géographique (SIG), afin de promouvoir la combinaison de différentes informations spatiales telles que des cartes cadastrales et d'utilisation des sols, les ortho-images et les MNT, entre autres, afin d'identifier les causes possibles du phénomène de subsidence dans les zones urbaines.

2.2 Notions de base du Système SAR

2.2.1 Géométrie SAR

La Figure 1 montre la géométrie de base d'un système SAR. Le satellite se déplace vers l'azimut et sa trajectoire et son vecteur de vitesse sont connus. Après l'interaction avec la surface imagée, les échos reviennent au capteur et sont échantillonnés en *range* ou "distance" en français.

La géométrie de visée latérale, typique des systèmes SAR, élimine l'ambiguïté produit entre deux échos de même distance (symétriques par rapport au nadir). En présence de relief, il peut néanmoins subsister des zones de repliement (*foldover*) lorsque l'angle d'incidence est trop faible par rapport à la pente locale.

La largeur de la fauchée est fonction de l'élévation et la taille de l'antenne, de ainsi que de la longueur d'onde et des traitements appliqués. La partie proche du nadir du satellite (normale à la surface) est appelée *near range* et la plus loin *far range*. L'angle entre l'impulsion de micro-ondes transmises et le nadir du satellite est défini comme l'angle d'incidence (θ) et augmente à travers la fauchée. La distance entre le système SAR et une cible est la distance oblique (ρ) qui est clairement une fonction de l'angle d'incidence et de la topographie de la surface. La direction de visée (*line of sight*) est généralement perpendiculaire au vecteur de vitesse.

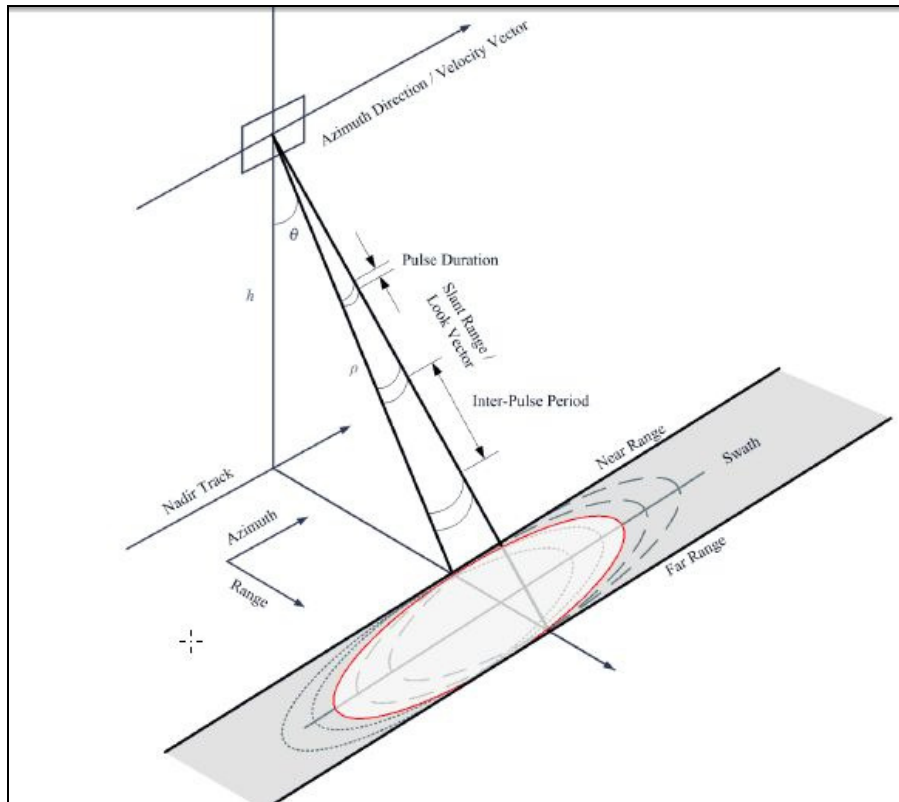


Figure 1 Géométrie du système SAR (Skolnik 1990). Les ellipses successives représentent la zone imagée par chaque pulse dans la fauchée (*swath*). La scène est limitée par la distance en zone proche (*near range*) et la zone loin (*far range*) et, en azimuth, pour l'heure de début et de fin d'acquisition.

L'image originale contient des valeurs complexes et est bidimensionnelle, avec comme axes en géométrie radar: (a) la distance (*slant range*) qui représente la distance perpendiculaire à la ligne de vol, (b) l'azimut, qui représente la trajectoire du capteur.

2.2.2 Résolution en distance

La résolution spatiale (dans une direction quelconque) est la distance minimale requise entre les deux points de sorte qu'ils sont discernés comme des objets séparés dans l'image. Avant corrélation avec le signal émis (données brutes appelées *raw*), deux cibles doivent être séparées par une distance oblique plus grande que la moitié de la longueur physique de l'impulsion (Li, Held et al. 1985). Après corrélation avec le signal émis (compression en *range*), la résolution est directement liée à la bande de l'impulsion émise par le capteur : plus la bande émise est large, plus fine est la résolution en distance. Comme le signal radar se déplace vers la cible et retourne au capteur, la résolution est divisée par deux. Cette résolution en *slant range* utilisée en géométrie radar diffère de la résolution au sol (*ground range*) utilisée en géométrie du terrain qui dépend de l'angle d'incidence locale. La résolution en *slant range* est constante sur toute l'image (entre *near* et *far range*). Les images du satellite Radarsat-2 Fine ont 5,2 mètres résolution nominal en *slant range*.

2.2.3 Résolution en azimut

La résolution en azimut dépend des caractéristiques de l'antenne du système SAR et de son ouverture synthétique. Avant la synthèse d'ouverture, elle dépend de la distance en *range*, de la longueur d'onde et de la longueur de l'antenne réelle. Avec l'éloignement des satellites, cette résolution initiale est supérieure au kilomètre..

En revanche, comme une cible est vue par un grand nombre d'impulsions, plusieurs échos sont enregistrés par le système le long de la trajectoire en azimut . L'ouverture synthétique transforme ces multiples retours d'une même cible en une seule réponse, ce qui réduit efficacement la résolution en azimut des kilomètres à quelques mètres (Hanssen 2001). La synthèse des multiples retours est appelée compression en azimut et est analogue au filtre adapté (ou *matched filter*, également connu sous le nom de compression en *range*) qui est utilisé pour améliorer de résolution en *range*. La résolution nominale en azimut des images mode Fine du satellite Radarsat-2 est de 7.7m.

2.2.4 Caractéristiques des images SAR

Après focalisation en range et en azimuth, les images utilisées en interférométrie SAR contiennent des pixels complexes (format SLC ou *Single Look Complex*) avec une partie réelle (q) et une partie imaginaire (i). La Figure 2 montre la relation entre les composantes réelles et imaginaires et les valeurs d'amplitude et de phase. Le calcul des valeurs de phase et d'amplitude est équivalent à la conversion entre les coordonnées polaires et cartésiennes.

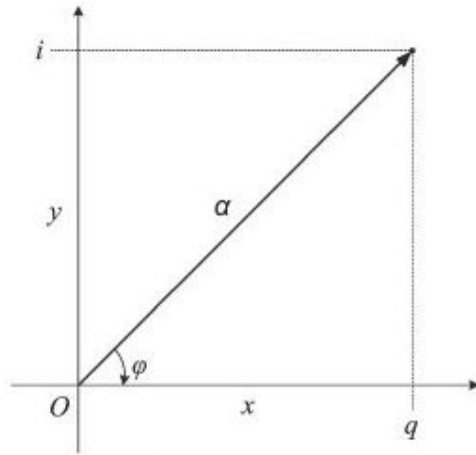


Figure 2 – Représentation d'un pixel SLC dans les coordonnées x et y en utilisant le diagramme d'Argand : partie réelle (q) et imaginaire (i), phase (φ) et amplitude (α).

La résolution d'un pixel dans l'image SLC (environ 20m en *ground range* pour ENVISAT, par exemple) par rapport à la longueur d'onde (5.6cm) est grande et la zone représentée par chaque pixel peut contenir des centaines de cibles individuelles. Chaque cible à son propre coefficient de réflexion et ces éléments peuvent entraîner un retard ou une rotation de phase. La valeur de phase de chaque pixel est la somme d'une quantité inconnue de nombres complexes qui représentent une valeur aléatoire (Massonnet and Feigl 1998) appelée phase propre.

Mais si les cibles d'un pixel élémentaire restent stables entre les acquisitions des images sous des angles très proches, les valeurs de phase propre sont déterministes et pourront être éliminées par différence de phase. Ainsi, il est possible d'isoler les contributions de phase ou le changement phase, ce qui est la base fondamentale de l'interférométrie.

2.2.5 La phase interférométrique

La phase interférométrique, définie comme la différence de phase entre deux d'acquisitions, forme des franges d'interférence selon le même principe que l'expérience d'Young. Les

franges dans les interférogrammes sont produites parce que ses origines sont cohérentes tout en provenant de différentes positions. Plus les satellites sont éloignés au moment de l'acquisition des images, plus le nombre de franges de l'image est important. Par conséquent, le nombre de franges dans l'image SAR dépend de la ligne de base perpendiculaire (BL) entre les systèmes. Les franges apparaissent dans l'image appelée interférogramme lorsque la distance entre le capteur et le sol augmente, entre les limites de *near* et *far range*, et sont encore renforcées par la courbure de la Terre et le relief.

L'exploration de l'information de phase interférométrique nécessite de la connaissance de la position des capteurs au moment de l'acquisition de sorte qu'il est possible reconstituer la géométrie de SAR.

En règle générale, les deux images sont acquises à partir de la même orbite des satellites, ce qui signifie que la base temporelle minimum pour l'interférométrie de passages répétés est égale à un cycle orbital complet du satellite (24 jours pour Radarsat-2, par exemple).

Si la réponse des cibles dans une zone spécifique reste stable au cours du temps, on peut travailler avec sur une base temporelle plus importante (annuelle ou plus) en utilisant l'interférométrie. En règle générale, la plupart des cibles perdent temporellement la cohérence, comme les plans d'eau et la neige sur la surface qui sont éphémères, ou les sables qui sont déplacés. Le temps et les saisons pour la végétation, ainsi que l'intervention humaine dans l'agriculture par exemple, entraînent des modifications significatives de la couverture de la surface.

La perte de cohérence s'accroît également avec la différence de position entre les deux acquisitions satellites (base perpendiculaire), parce que lorsque celui-ci augmente, d'une part la phase propre évolue (les cibles ne sont plus vues sous le même angle) et d'autre part le nombre de franges dans l'image s'élève et une telle interférence est plus sensible aux effets du bruit.

La valeur de ligne de base perpendiculaire créant une rotation de phase supérieure à 2π par cellule de résolution est connue comme la *baseline* critique, et les images qui ont des bases perpendiculaires élevées ne sont pas utilisés dans le traitement InSAR.

À la mesure de phase contribuent beaucoup de phénomènes physiques qui créent des franges dans l'interférogramme. Les facteurs principaux qui contribuent sont :

- La topographie - ϕ_{topo}
- L'atmosphère - ϕ_{atmo}
- L'orbite - ϕ_{orbitale}
- Le bruit - ϕ_{bruit}
- Le déplacement - ϕ_{depl}

En général, la phase différentielle est alors constituée d'une somme de termes :

$$\varphi = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{orbitale}} + \varphi_{\text{bruit}} + \varphi_{\text{depl}}$$

L'utilisation de la phase interférométrique nécessite d'isoler ou supprimer les effets dus à la topographie, à l'atmosphère et aux orbites. Pour pouvoir supprimer les effets parasites il faut comprendre les causes qui les produisent. Dans les sections suivantes nous présentons les facteurs les plus importants en InSAR.

2.2.6 Géométrie InSAR

La géométrie d'acquisitions InSAR est illustrée par la Figure 3, où P et P_0 représentent des points équidistants en *slant range* pour l'acquisition S_1 . Le diagramme suggère que la trigonométrie peut être utilisée pour observer la différence d'angle entre P_0 dans l'ellipsoïde et P sur la surface de terrain, lorsque les deux acquisitions d'un système SAR proviennent de différentes positions.

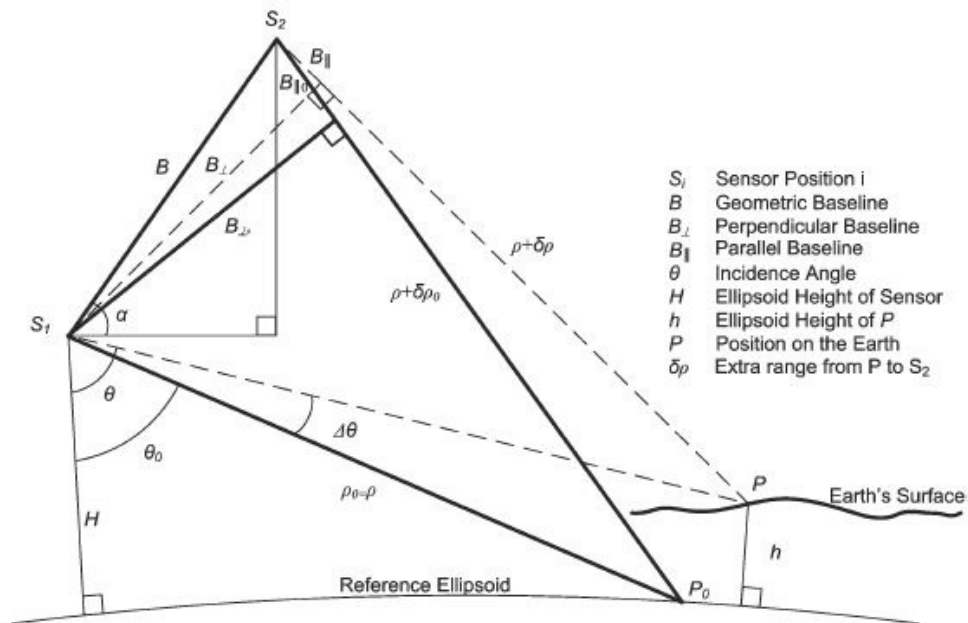


Figure 3– Géométrie InSAR relative au terrain et à l'ellipsoïde. La phase interférométrique est liée à la longueur de la trajectoire en plus ($\delta\rho$) entre S_2 et P . Le triangle en pointillés représente la géométrie InSAR par rapport au sol et le triangle gras par rapport à l'ellipsoïde. Les termes représentés par 0 se réfèrent à la géométrie ellipsoïdale (Hanssen 2001).

En satellitaire, cette géométrie InSAR est obtenue par des passages répétés (ou *repeat-pass*), avec des acquisitions effectuées à des moments différents par le même capteur. Les deux acquisitions SAR, S_1 et S_2 sont donc séparées dans le temps, et par la base (*baseline*) géométrique B , dont la *baseline* perpendiculaire (B_{\perp}). Dans un modèle idéal, les

valeurs de phase de S1 et S2 sont proportionnelles à la distance de l'ensemble du chemin parcouru par l'onde (ρ et $\rho + \delta\rho$), entre le satellite et la surface et son retour vers le capteur (Goldstein, Zebker et al. 1988).

a phase interférométrique (Φ) vaut alors :

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho$$

où λ représente la longueur d'onde du système SAR et $\delta\rho$ la différence de trajectoire entre S_1 et S_2 .

Après développement et élimination des termes négligeables, le terme $\delta\rho$ peut-être approximé par (Goldstein, Zebker et al. 1988) :

$$\delta\rho = -B \sin(\theta - \alpha)$$

où θ est l'angle de visée, et α représente l'angle entre la ligne de base et la projection horizontale en S_1 . En substituant dans l'équation, nous avons:

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha)$$

En pratique, la détermination exacte du terme géométrique $\delta\rho$ n'est pas possible en raison de l'ambiguïté de phase (obtenue modulo 2π), ainsi que des erreurs relatives à l'information orbitale. Cependant, la relation entre $\delta\rho$ et θ peut être déterminée à partir de dérivation simple d'une valeur initiale de θ réfèrent à l'ellipsoïde. Une description complète peut être trouvée dans Hanssen (2001).

2.2.7 Interférométrie différentielle (DInSAR) et l'approche PSInSAR

L'interférométrie différentielle ou DInSAR est basée sur le calcul de la différence de phase dans une base pixel par pixel, entre deux images acquises à des moments différents. La différence de chemin à l'origine des franges topographiques et orbitales doit être éliminée soit à l'aide d'un modèle numérique de terrain disponible sur la zone imagée, soit par combinaison de plusieurs interférogrammes. Contrairement aux mesures in-situ, les analyses et résultats DInSAR observent alors la déformation de surfaces continues dans l'image, qui généralisent l'information et permettent d'atteindre des échelles plus régionales. La première démonstration de la technique DInSAR appliquée aux déplacements détecter au sol a été présenté par (Gabriel, Goldstein et al. 1989). Les premiers résultats qui ont

véritablement lancé la technique D-InSAR ont été obtenus avec le satellite ERS-1 sur le déplacement cosismique de la faille des Landers (USA) (Massonnet, Rossi et al. 1993). La qualité des mesures de déplacement obtenu par l'approche traditionnelle DInSAR est limitée par le bruit de phase temporelle et la contamination de la phase atmosphérique (Brisco, Short et al. 2009). Des techniques plus avancées, telles que le *Point Target InSAR* (PTI)¹ (Ferretti, Prati et al. 2000), le *Short Baseline Subset* (SBAS) (Berardino, Fornaro et al. 2000) et le *Dual-Scale PTI* (Rabus and Ghuman 2009) représentent des améliorations significatives par rapport au DInSAR traditionnel.

¹ *Point Target InSAR* (PTI) est un synonyme de *Persistent Scatter InSAR* (PSI). Nous utilisons le premier terme dans ce document car il est plus descriptive et se réfère à la "*pointiness*" de la géométrie pixel. En outre, le terme PSI peut être ambigu, car un *Distributed Scatterer* (DS) – aussi décrit plus tard dans ce document - pourrait également être «*persistant*» au fil du temps.

3 DInSAR appliqué aux données Radarsat-1 sur la ville de Manaus : la chaîne de traitement et résultats

Ce chapitre présente les principales étapes de la technique DInSAR qui ont été appliquées sur la pile de données du satellite Radarsat-1 acquises entre 2006 et 2008 sur la région de Manaus en utilisant les outils EFIDIR pendant le séjour de doctorat en France. Les résultats préliminaires de l'analyse sont décrits et seront intégrés plus tard aux résultats du chapitre 4. A la fin de ce document, nous présentons l'article publié dans la Revue Française de Télédétection et Photogrammétrie où l'analyse DInSAR a été intégrée au contexte tectonique et structural obtenu par l'analyse du réseau de drainage et la comparaison de différentes images satellitaires optiques avec des informations géologiques et géomorphologiques existantes. La combinaison de l'ensemble des données disponibles fournit une interprétation géologique aux différents motifs obtenus par l'étude interférométrique.

3.1 Description des étapes de traitement DInSAR Radarsat-1

L'étude DInSAR effectuée sur la pile de 15 images acquises par le satellite Radarsat-1 est représentée dans le diagramme de la Figure 4. Cette étude est basée sur les données originales du radar, les images complexes en format SLC (*Single Look Complex*) et le Modelé Numérique de Terrain (MNT) obtenu par la mission SRTM.

Dans un premier bloc, qu'on appelle le *Pre-processing*, les interférogrammes correspondants aux « couples d'images » sont formés et analysés selon leurs caractéristiques de niveau de cohérence, réponse de phase et leurs valeurs de ligne de base (*baseline*) géométrique. La réduction d'échelle initiale par *multilooking* est limitée pour éviter les effets d'aliasing. La simulation et la soustraction de franges orbitales et topographiques sont effectuées à partir des informations du MNT et des orbites du satellite Radarsat-1.

Dans un second bloc, à la suite du *pre-processing*, les interférogrammes différentiels sont filtrés avec une nouvelle réduction d'échelle afin de réduire l'influence du bruit pour l'optimisation de l'analyse des fréquences locales. Les derniers étapes de déroulement de phase et traitement statistique ont pour objectif de mesurer le déplacement du terrain.

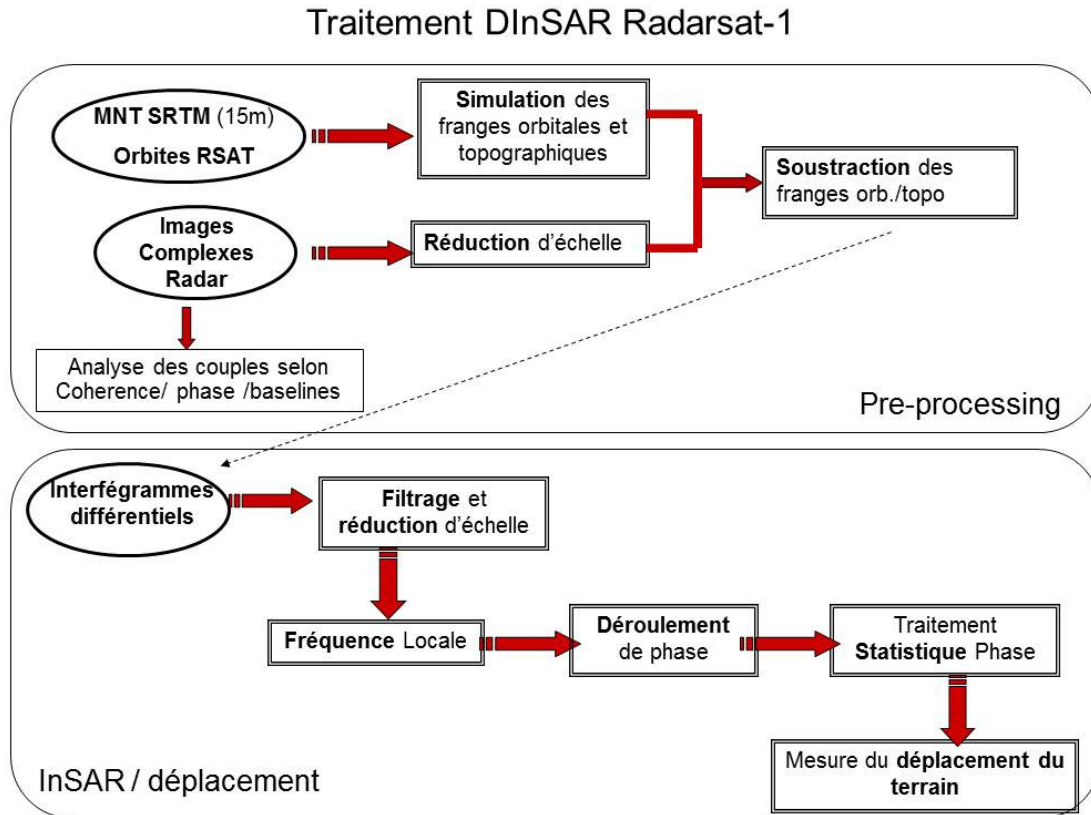


Figure 4 – Résumé de la méthodologie DInSAR appliquée sur les données Radarsat-1.

Les étapes mentionnées sont détaillées et illustrées dans les sections suivantes. Le recalage et la formation de couples qui sont intrinsèques au pre-processing sont aussi montrés. Les premiers résultats de cette analyse sont présentés dans la section 3.2. Ils ont été intégrés au contexte géologique et présentés dans un article de revue francophone.

3.1.1 Recalage et formation d'interférogramme

La configuration InSAR satellitaire repose sur l'acquisition de deux ou plusieurs images à différents moments sur des orbites répétées dont les informations sont plus ou moins bien connues. Le temps initial de l'imagerie (enregistrement de la première ligne en azimuth) et l'angle d'incidence varient très légèrement pour chaque acquisition. Ainsi, les images sont générées avec une couverture spatiale et un échantillonnage légèrement différents qui entraînent une distorsion géométrique et même des réponses différentes pour les mêmes

cibles. L'objectif du recalage (ou *coregistration*) des images est de déterminer la transformation qui permettra de cartographier l'emplacement du pixel d'une image donnée sur une autre image de référence.

Dans le traitement interférométrique, les images doivent être recalées simultanément avec une précision de l'ordre du $10^{\text{ème}}$ de pixel : par exemple 0.12 de la taille du pixel conduit à une perte de cohérence de 4% (Bamler and Hartl 1998) qui devient non significative.

Une procédure *standard* est d'estimer les décalages entre l'image de référence (appelée maître) et les autres images (appelés esclaves). En général, le traitement est divisé en deux étapes, grossières et fines, tel que défini par Hanssen (2001).

L'interpolation est utilisée pour déterminer les valeurs des pixels des images esclaves sur leurs nouveaux emplacements. L'interpolation est une procédure qui tient compte de la précision à atteindre et l'effort de calcul requis. Bamler et Hanssen (1998) ont conclu que le choix d'interpolation (le *kernel* optimale) dépend des propriétés de corrélation du signal.

Li et Bethel (2008) ont testé les différents algorithmes de rééchantillonnage et concluent qu'il n'existe pas un seul algorithme d'interpolation qui peut être utilisé dans toutes les situations de rééchantillonnage des données SAR.

Après le ré-échantillonnage, les images maître et esclave peuvent être considérées comme identiques en termes de taille et de matrices complexes de valeurs, ce qui permet la formation d'interférogrammes à partir du produit de la valeur complexe du pixel de l'image maître et de son conjugué à l'image de l'esclave correspondant :

$$p(x, y) = s_1(x, y) s_2^*(x, y)$$

où $p(x, y)$ représente la valeur interférométrique du pixel situé en (x, y) , S_1 est la valeur du pixel dans l'image maître SLC et S_2 est le complexe conjugué du pixel de l'image esclave. Ainsi, les valeurs d'amplitude sont multipliées et les valeurs de phase différenciées. Le résultat est également complexe et se compose du produit de l'amplitude et de la phase interférométrique. L'interférogramme de la Figure 5 sur la ville de Nottingham en Angleterre montre l'information de phase comme un cycle périodique coloré (frange) et le produit des amplitudes en luminosité.

La région de faible amplitude, en particulier l'image de gauche correspond aux zones rurales qui perdent la cohérence plus rapidement que la zone urbaine dans le centre de l'image. Si l'on dispose de plusieurs interférogrammes, la stabilité de l'amplitude au cours du temps constitue un outil utile pour analyser la visibilité des franges d'interférence.

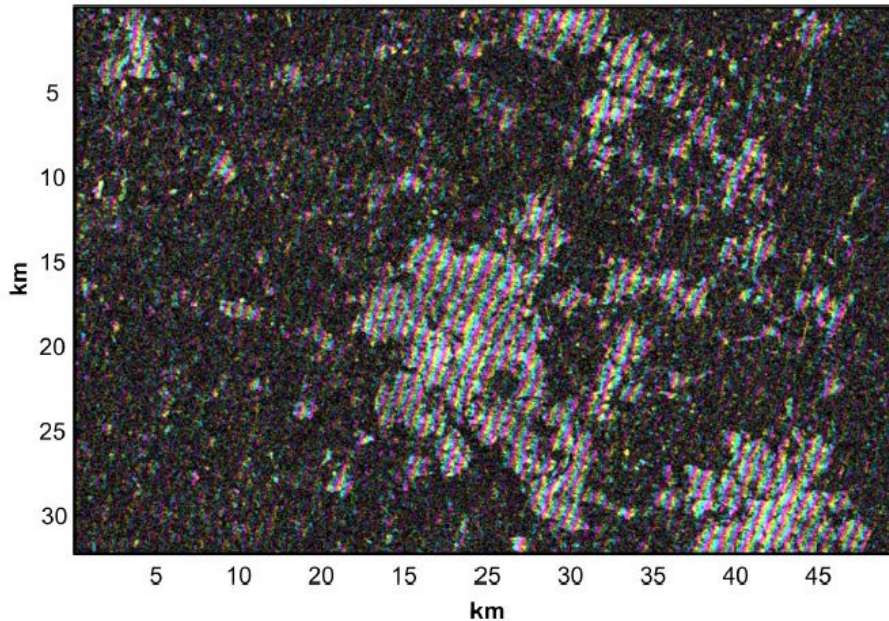


Figure 5 - Interférogramme sur la ville de Nottingham (Angleterre) en couvrant une région de 1500km² (Leighton 2010).

3.1.2 Analyse des couples : *baseline* cohérence et phase,

Baseline perpendiculaire

Les valeurs de ligne de base perpendiculaire au centre de l'image ont été calculées à partir des outils EFIDIR pour 57 couples d'images Radarsat-1 qui représentent toutes les combinaisons possibles de dates avec des valeurs inférieures à 750m. Ces couples ont été générés en utilisant différentes scènes maîtres comme montre le **Error! Reference source not found.**, qui présente également la distribution des valeurs de *baseline* perpendiculaire et temporelle pour les 57 paires interférométriques considérés dans l'étude Radarsat-1.

Maître (aaaammjj)	esclave (aaaammjj)	<i>Baseline</i> Perp (m)	<i>Baseline</i> Temp (jours)
20060812	20061023	-369,8975	72
20060812	20061116	-416,2872	96
20060812	20061210	193,108	120
20060812	20070409	640,2075	240
20060812	20070527	732,4662	288
20060812	20070714	571,0977	336

20060812	20070924	-626,113	408
20060812	20071018	-458,7222	432
20060812	20071111	-14,5741	456
20060812	20071205	-410,5084	480
20060929	20061210	-644,0253	72
20060929	20070409	-196,9258	192
20060929	20070527	-104,6671	240
20060929	20070714	-266,0356	288
20061023	20061116	-46,3897	24
20061023	20061210	563,0055	48
20061023	20070503	-614,1591	192
20061023	20070807	-419,9735	288
20061023	20070924	-256,2155	336
20061023	20071018	-88,8247	360
20061023	20071111	355,3234	384
20061023	20071205	-40,6109	408
20061116	20061210	609,3952	24
20061116	20070503	-567,7694	168
20061116	20070807	-373,5838	264
20061116	20070924	-209,8258	312
20061116	20071018	-42,435	336
20061116	20071111	401,7131	360
20061116	20071205	5,7788	384
20061210	20070409	447,0995	120
20061210	20070527	539,3582	168
20061210	20070714	377,9897	216
20061210	20071018	-651,8302	312
20061210	20071111	-207,6821	336
20061210	20071205	-603,6164	360
20070409	20070527	92,2587	48
20070409	20070714	-69,1098	96
20070409	20071111	-654,7816	216
20070503	20070620	-252,4147	48
20070503	20070807	194,1856	96
20070503	20070924	357,9436	144
20070503	20071018	525,3344	168
20070503	20071205	573,5482	216
20070527	20070714	-161,3685	48
20070527	20071111	-747,0403	168
20070620	20070807	446,6003	48
20070620	20070924	610,3583	96
20070714	20071111	-585,6718	120
20070807	20070924	163,758	48
20070807	20071018	331,1488	72

20070807	20071205	379,3626	120
20070924	20071018	167,3908	24
20070924	20071111	611,5389	48
20070924	20071205	215,6046	72
20071018	20071111	444,1481	24
20071018	20071205	48,2138	48
20071111	20071205	-395,9343	24

Tableau 1 – Dates des images Radarsat-1, valeurs de *baseline* perpendiculaire et temporelle pour les 57 couples sélectionnés.

Cohérence

La cohérence mesure la corrélation complexe normalisée entre deux images SAR S_1 et S_2 et est définie par :

$$\gamma_{S_1 S_2} = \frac{|\langle S_1 S_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle |S_1|^2 \rangle \langle |S_2|^2 \rangle}}$$

où S_1 et S_2 représentent les valeurs complexes des pixels des deux images et $\langle \rangle$ représente la moyenne.

Les informations de cohérence obtenues dans le processus de création de l'interférogramme permettent de mesurer la corrélation et la stabilité de la phase interférométrique entre les deux signaux avec des valeurs entre zéro (où il n'y a pas de corrélation) et 1 (corrélation parfaite). Les informations relatives de cohérence sont utiles seulement quand analysées dans un intervalle donné de temps ou d'espace (Woodhouse 2006). Comme les structures urbaines changent, normalement, beaucoup plus lentement que la végétation, les valeurs élevées de cohérence sont généralement trouvés dans les villes et les zones urbaines tandis que la forêt, par exemple, a des niveaux très bas (Figure 6).

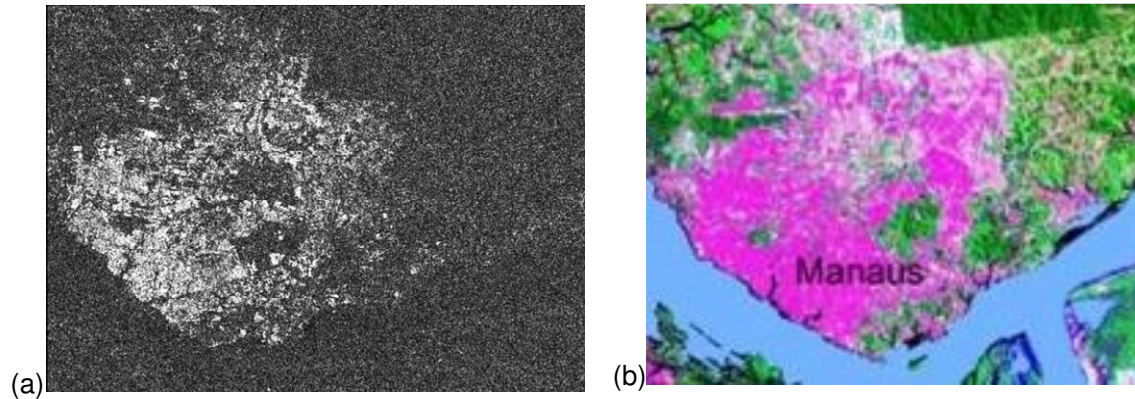


Figure 6 - (a) Image de cohérence sur la région de Manaus, interférogramme Radarsat-1, 23 octobre 2006 / 5 décembre 2007. *Baseline* perpendiculaire de 40m; (b) Image du satellite Landsat sur la même région.

Il est possible d'observer que les plus hautes valeurs de cohérence se concentrent sur la zone urbaine de Manaus (rose dans l'image b). En dehors de la ville les valeurs de cohérence sont proches de zéro en raison de la présence de la forêt et des rivières qui limitent géographiquement la région.

Phase

A partir des images SLC recalées, il est possible d'analyser et sélectionner les couples selon la distribution des franges qui représentent l'information de phase. Un phénomène d'aliasing (ou repliement spectral) se produit lorsque la fréquence d'échantillonnage utilisée est inférieure à la fréquence de Nyquist du signal qui est en cours d'analyse. Pour les bases les plus importantes, il est important d'éviter cet effet causé par la rééchantillonnage d'un signal d'haute fréquence à faible résolution. Dans cette étude, différentes valeurs de rééchantillonnage des fenêtres ont été testées afin d'éviter l'effet d'aliasing dans l'étape de *complex-multilooking*.

3.1.3 Réduction d'échelle ou *Multilooking*

La technique *Multilooking* représente une moyenne spatiale des composants complexes du signal et est appliquée dans les interférogrammes complexes à partir d'une fenêtre déterminée avec l'objectif de réduire la variance statistique du bruit.

La taille du pixel de l'interférogrammes augmente en fonction du nombre de pixels regroupés dans chaque direction, mais les statistiques des valeurs de phase présentent une

amélioration significative (Lee, Miller et al. 1994) car l'écart type de l'estimation de phase est proportionnelle au nombre de pixels sur lesquels la moyenne est calculée. Le bruit de la phase interférométrique peut être calculé à partir du nombre de "looks" et la cohérence de l'interférogramme. Par conséquent, le *multilooking* peut améliorer la fiabilité de le déroulement de phase (Goldstein, Zebker et al. 1988), en réduisant la résolution spatiale. La Figure 7 montre un exemple d'interférogrammes traités avec le *multilooking* ou le graphique correspondant aux valeurs de l'écart type de la phase interférométrique et du nombre de *looks*.

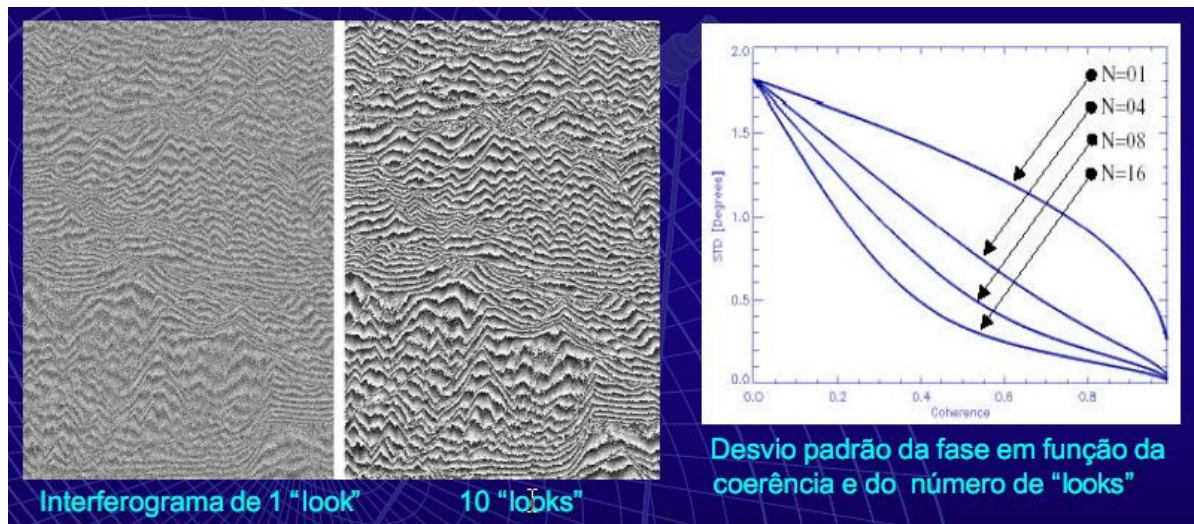


Figure 7 - Interférogrammes avec 1 et 10 looks. Le graphic present le rapport entre l'écart-type de phase e le nombre de "looks" (N).

L'étape de *multilooking* peut être utilisée dans le traitement InSAR plus d'une fois, entre les autres étapes et le nombre de *looks* doit s'adapter à l'objectif de chaque application ainsi qu'aux caractéristiques du capteur utilisé et au comportement de la phase dans les différents scénarios géographiques. Pour la correction de base géométrique, par exemple, on utilise des valeurs plus élevées que 8×12 (*range* x azimuth). Pour l'analyse finale des interférogrammes qui nécessite une préservation maximale de la résolution des données, il faut travailler avec des fenêtres plus petites comme 2×3 et compatible avec la résolution de l'analyse. Il est également utile que le nombre de vues possède un ratio qui permette de se rapprocher de pixels carrés. Pour les données ENVISAT, par exemple, il est recommandé des fenêtres 1×5 ou 2×10 , cette dernière correspondant à une moyenne de 2 pixels en distance (*range*) et 10 pixels en azimuth, conduisant à des pixels à peu près carrés.

3.1.4 Simulation et soustraction des franges

En se basant sur des algorithmes bien connus et documentés, le recalage et la simulation des franges sont influencés par la qualité des paramètres utilisés dans ces calculs. Dans cette étape de la chaîne de traitement, les programmes SARLUT, distribués dans la plateforme ouverte d'outils EFIDIR ont été utilisés. Un aperçu des étapes de traitement est décrit comme suit:

- (a) les informations des vecteurs de vitesse sont extraites pour chaque image;
- (b) l'émulation des orbites par un polynôme donné et les estimateurs;
- (c) calcul de la distance entre les orbites et le terrain à l'aide d'un MNT;
- (d) la génération d'image de temps d'acquisition en utilisant l'approche CPA (*Closest Point Approach*);
- (e) calcul des look-up table donnant la position en distance (*range*) et azimuth des points du MNT;
- (f) calcul de *baseline* orthogonale pour les images maître et l'esclave basé sur leurs valeurs de *baseline* et angles d'incidence;
- (g) recalage des images esclaves et le maître par différentes méthodes d'interpolation,
- (h) conversion entre la géométrie terrain et celle du radar
- (i) soustraction des franges par filtrage et / ou changement d'échelle, si nécessaire.

L'approche des outils EFIDIR a été mise en œuvre pour le recalage des images esclaves SAR par rapport à l'image maître. La géolocalisation de ces images est basée sur la trajectoire du satellite supposée suffisamment précise et deux points bien définis, avec une distance approximative entre ces deux points sélectionnés, soit par l'utilisateur final ou définie dans le fichier de métadonnées. Le programme effectue une interpolation polynomiale des orbites. calculée En premier lieu, les coefficients du polynôme sont calculés par moindres carrés. Le degré du polynôme est spécifiée par l'utilisateur final comme un paramètre d'entrée et doit être adaptée au nombre de vecteurs d'état disponibles dans le fichier de métadonnées, par exemple, un degré 4 ou moins pour le satellite RADARSAT-2, un degré 7 pour les données TerraSAR-X où plus de state-vecteurs sont fournis. Cette étape permet deux tâches spécifiques liées à la procédure de ré-échantillonnage, à savoir : fournit un masque de visibilité qui marque le zones d'ombres et de foldover (dans le cas de l'application en haut-relief) et génère une image des différences de distance entre l'image SAR esclave ré-échantillonné et l'image maître.

Pour la simulation et soustraction des franges orbitales et topographiques, il est nécessaire de traiter certains résultats intermédiaires comme la différence de distance par exemple, déjà mis en géométrie radar (Figure 8). Après le calcul de l'interférogramme complexe, les sorties sont présentées en cohérence, phase et d'amplitude, filtrée ou non.

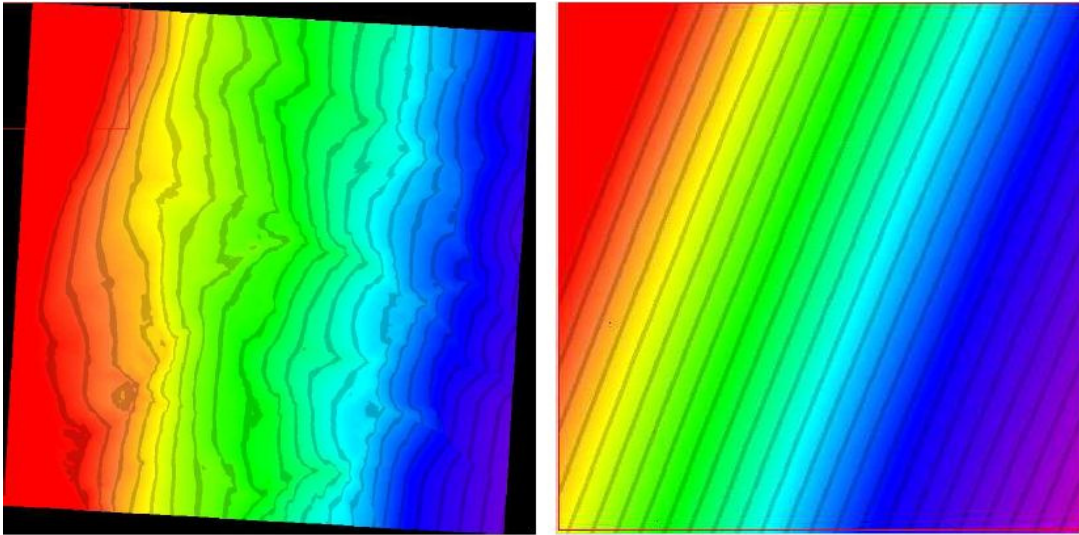


Figure 8 – L'image de différence de distance: (a) Vallée du Chamonix en France ; (b) Manaus, Amazonas.

Ce traitement automatique proposé est bien effectué dans les données de RADARSAT-1, même si ce dernier n'a pas la calibration *zéro doppler* et les informations des orbites précises. Comme un objectif final, cette chaîne de traitement permet d'identifier les autres franges dues aux effets atmosphériques et des déplacements de terrain, comme montre la Figure 9.

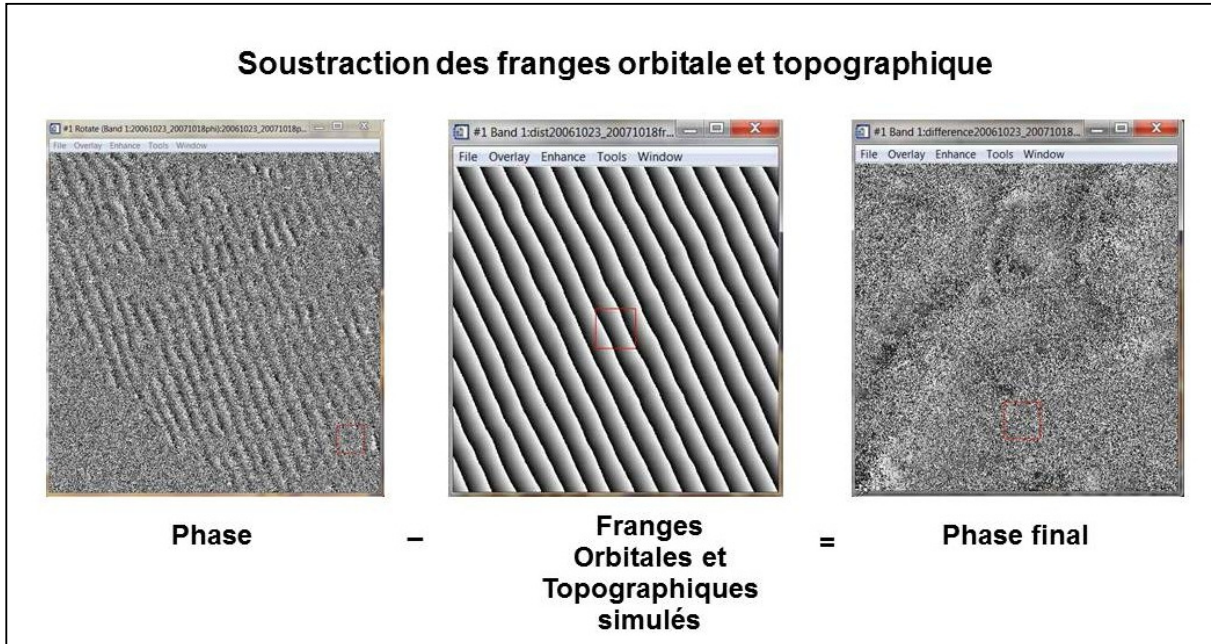


Figure 9 - Soustraction des franges orbitales et topographiques.

3.1.5 Filtrage

En général, le filtrage atténue les fréquences qui sont en dehors d'un certain intervalle d'intérêt, et est normalement utilisé pour réduire le bruit. Des filtres bidimensionnels spécifiés en termes de normalisation des fréquences centrales sont couramment utilisés dans l'interférométrie SAR.

Les méthodes de filtrage adaptatif sont également de plus en plus courantes dans le traitement InSAR. Ces filtres n'ont pas une réponse impulsionnelle fixe, mais s'adaptent aux données à partir de certaines caractéristiques telles que la SNR (*signal-to-noise-ratio* ou rapport signal / bruit), la cohérence, le montant des franges, le gradient du terrain, parmi d'autres (Goldstein and C.L.Werner 1998). Cette approche est basée sur l'application de filtrage sur les zones qui en ont le plus besoin, tout en préservant les zones les moins touchées par le bruit, optimisant ainsi l'utilisation et la précision des résultats.

3.1.6 Estimation de fréquences locales

L'estimation de fréquences locales peut être défini comme l'estimation du gradient de phase qui correspond à la fréquence instantanée du signal complexe. Dans la méthode de

déroulement de phase utilisée dans la présente étude, les franges sur l'interférogramme sont caractérisées par la mesure de fréquence locale comme proposé par (Trouvé, Caramma et al. 1996).

La fréquence bidimensionnelle (f_x, f_y) illustré dans la Figure 10 est estimée par un algorithme inspiré de la méthode *Multiple Signal Classification* (MUSIC). En chaque point sur l'interférogramme, en plus d'une estimation des fréquences locales (f_x, f_y) , une mesure de confiance associée, qui indique l'obtention de fréquences erronées, est aussi fournie par cet algorithme. La performance de l'estimation des fréquences locales par l'algorithme MUSIC peut être évaluée par la formation des images de largeur et d'orientation des franges à partir des fréquences locales estimées. Elle dépend des dimensions des fenêtres d'estimation par rapport à la largeur des franges.

Avec typiquement un vecteur signal de taille 9 (3×3) pixels et une matrice d'autocorrélation estimée sur une fenêtre 9×9 pixels, soit 49 réalisations, l'estimation est très robuste au bruit sur les franges relativement étroites (Yan 2011) . En présence d'un bruit important, les franges les plus larges nécessiteraient en revanche des fenêtres d'estimation plus importantes ou une réduction de la résolution accompagnée d'un filtrage passe-bas (Trouvé, Nicolas et al. 1998).

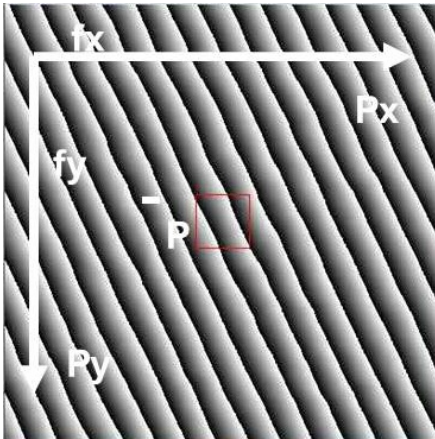


Figure 10 - Illustration des axes de fréquence locale sur les franges simulés d'un interférogramme. La lettre P désigne la période.

3.1.7 Déroulement de phase

Comme indiqué précédemment, l'information spatiale peut être déterminée par l'écart angulaire entre les deux acquisitions SAR, ce qui équivaut à mesure cumulative de la différence d'angle de phase entre les cellules de résolution voisines dans un

interférogramme SAR (Hanssen 2001). Comme la phase interférométrique est connue modulo 2π , il convient d'ajouter un certain nombre de cycles de 2π pour déterminer la différence absolue de phase. La relation entre la phase enroulée et la phase absolue est illustrée dans la Figure 11.

Le partie supérieure du diagramme représente la mesure modulo 2π de la phase original (enroulé ou *wrapped*) dans un interférogramme avec des variations (dents) de 2π . La partie inférieure montre la reconstruction de phase après le processus de déroulement. Dans cet exemple, l'information de phase n'a pas de contribution de bruit ou discontinuités et est visualisé en unidimensionnel (1D), mais en réalité, il y a un certain nombre de facteurs qui rendent des défis, surtout computationnels, pour le déroulement de phase (ou *unwrapping*), en particulier pour garder une cohérence spatiale en 2D. Ces facteurs renvoient aux notions de traitement du signal où les signaux réels continus doivent être échantillonnés et traités avec un pas d'échantillonnage approprié pour représenter le signal original de façon satisfaisante (Ghiglia and Romero 1994). Ainsi, dans une étape ultérieure, l'objectif est de reconstruire la forme continue originale de données à partir d'échantillons discrets.

Quand les données sont complètes, sans erreur et échantillonné à un taux suffisamment adéquate, la reconstruction ne dépend que de l'effort de calcul. Cependant, dans de nombreux scénarios du monde réel, le signal ne peut pas être parfaitement reconstruit et le déroulement de certains interférogrammes n'arrive pas à un degré de fiabilité acceptable.

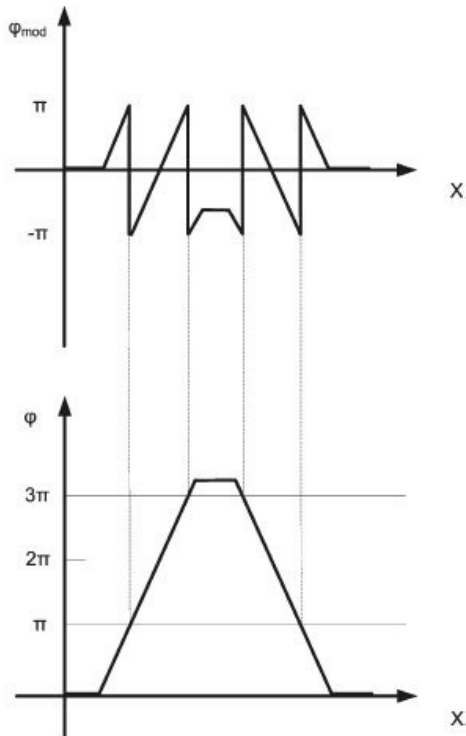


Figure 11 - Le graphique supérieure montre la phase interférométrique modulo 2π enroulé entre deux points et la graphique inférieure représente la reconstruction de phase après le déroulement.

Selon (Zebker, Werner et al. 1994) la performance de l'algorithme de déroulement de phase dépend de deux facteurs: le SNR (signal-to-noise-ratio) de l'interférogramme et l'espacement entre les franges interférométriques. Les deux principales approches sont les méthodes locales et globales. Les méthodes locales comprennent des algorithmes basés sur la détection des résidus tel que proposé par Goldstein et al. (1988) et par croissance de régions (déroulement de proche en proche). L'objectif est d'identifier et d'isoler les points où il y a des inconsistances de phase, afin d'éviter la propagation des erreurs lors du déroulement. Les méthodes globales cherchent à minimiser l'erreur globale, par exemple, la méthode des moindres carrés proposé par (Zebker and Lu 1998) et les techniques multi-résolution, entre autres.

Contrairement à l'exemple de la figure 10, la phase est toujours déroulée dans les deux directions. Les gradients entre des pixels adjacents dans l'image sont calculés et intégrés dans une trajectoire déterminée, conduisant ainsi à un résultat présente les valeurs par rapport à un point de départ. Les effets atmosphériques, les faibles valeurs de cohérence,

les discontinuités des franges, la décorrélation temporelle et les grandes lignes de base perpendiculaire influencent et peuvent compromettre ce processus.

L'approche pour le problème de déroulement de phase bidimensionnel, utilisée dans cette étude, consiste à rechercher une solution globale par une méthode de moindres carrés. Nous disposons des fréquences locales (présentées avant) et une mesure de confiance associée.

Ces informations sont utilisées comme entrées pour la méthode de déroulement de phase itérative proposée par (Ghiglia and Romero 1994).

3.2 Résultats obtenus

Le principal objectif de l'étude DInSAR sur la pile de données Radarsat-1 sur Manaus en utilisant les outils EFIDIR et réalisé pendant le séjour de doctorat en France était d'identifier et analyser le motif interférométrique trouvé par Ramos (2009). La

Figure 12 présente en détail la région d'intérêt, ou « le motif » considéré apparait comme une zone de mouvement de la croûte dans la ville de Manaus.

(a)

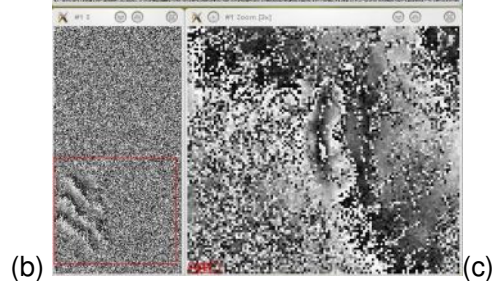
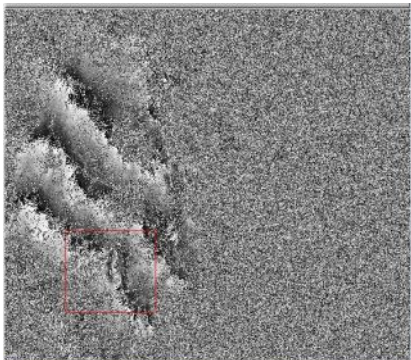


Figure 12 - (a) Distribution des franges sur l'interférogramme Radarsat-1 (16/11/2006 – 05/12/2007, *baseline* perpendiculaire de 5,7m) qui peut être totalement visualisé sur (b). La figure (c) présente le motif interférométrique appelé AMC par Ramos (2009).

L'interférogramme de la figure 12 représente l'information de phase originale, tandis que, toutes les contributions sont encore présentes, même si la *baseline* géométrique est toute petite (5,7 m). Même après avoir soustrait les franges orbitales et topographiques il est possible d'identifier le motif AMC (Figure 13).

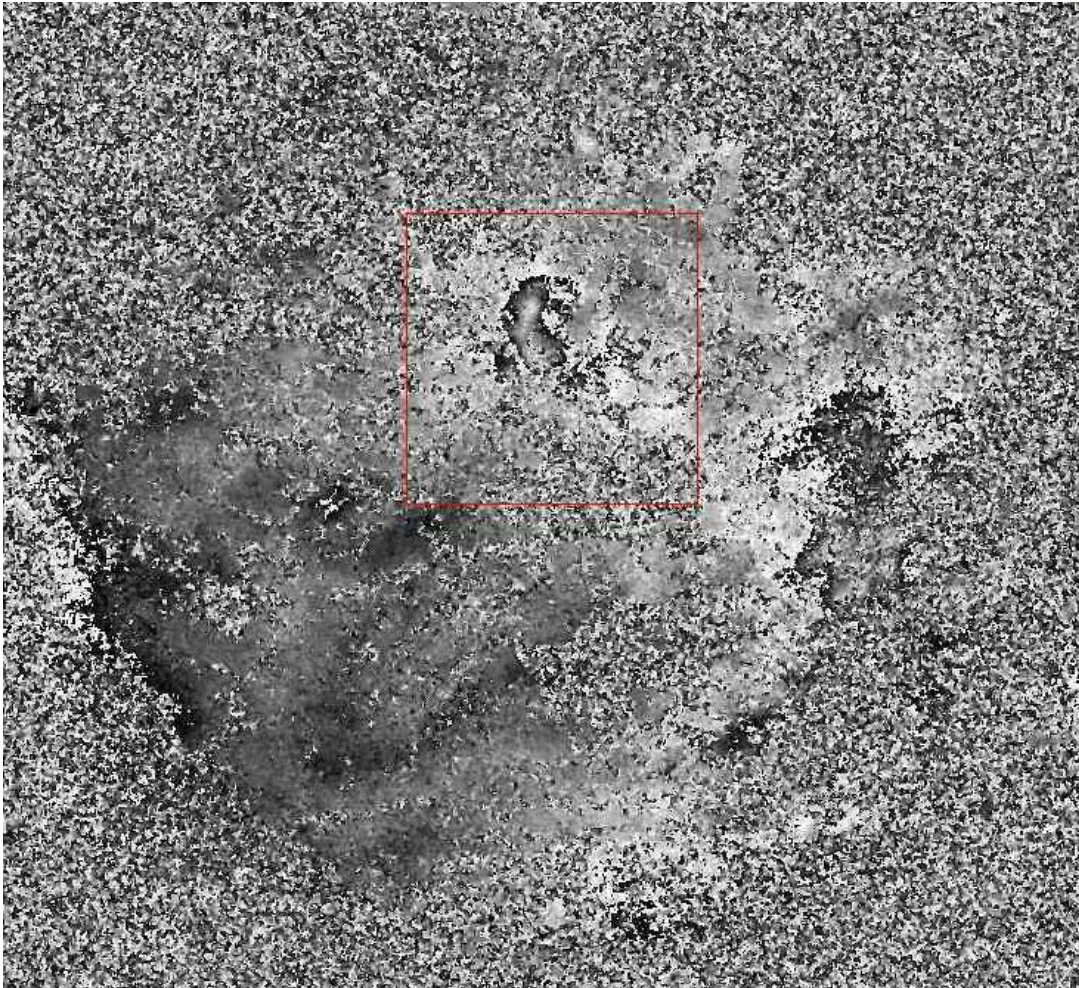


Figure 13 - Interférogramme (16/11/2006 – 05/12/2007) résultant de la soustraction des franges orbitales et topographiques. L'AMC en détail dedans le polygone rouge.

Sur les 22 interférogrammes traités et ré-échantillonnés avec un *multilooking* 2 x 3 (range x azimut), il y en a 12 où il est possible d'identifier clairement l'AMC. La figure 14 montre l'aspect du motif dans les 12 interférogrammes sélectionnés. Le tableau 3 présente les dates et les caractéristiques des couples sélectionnés. On peut noter que les dates des interférogrammes sont relativement indépendantes (6 dates maîtres différentes et 8 dates esclaves différentes), ce qui exclut la possibilité d'un motif produit par les effets atmosphériques.

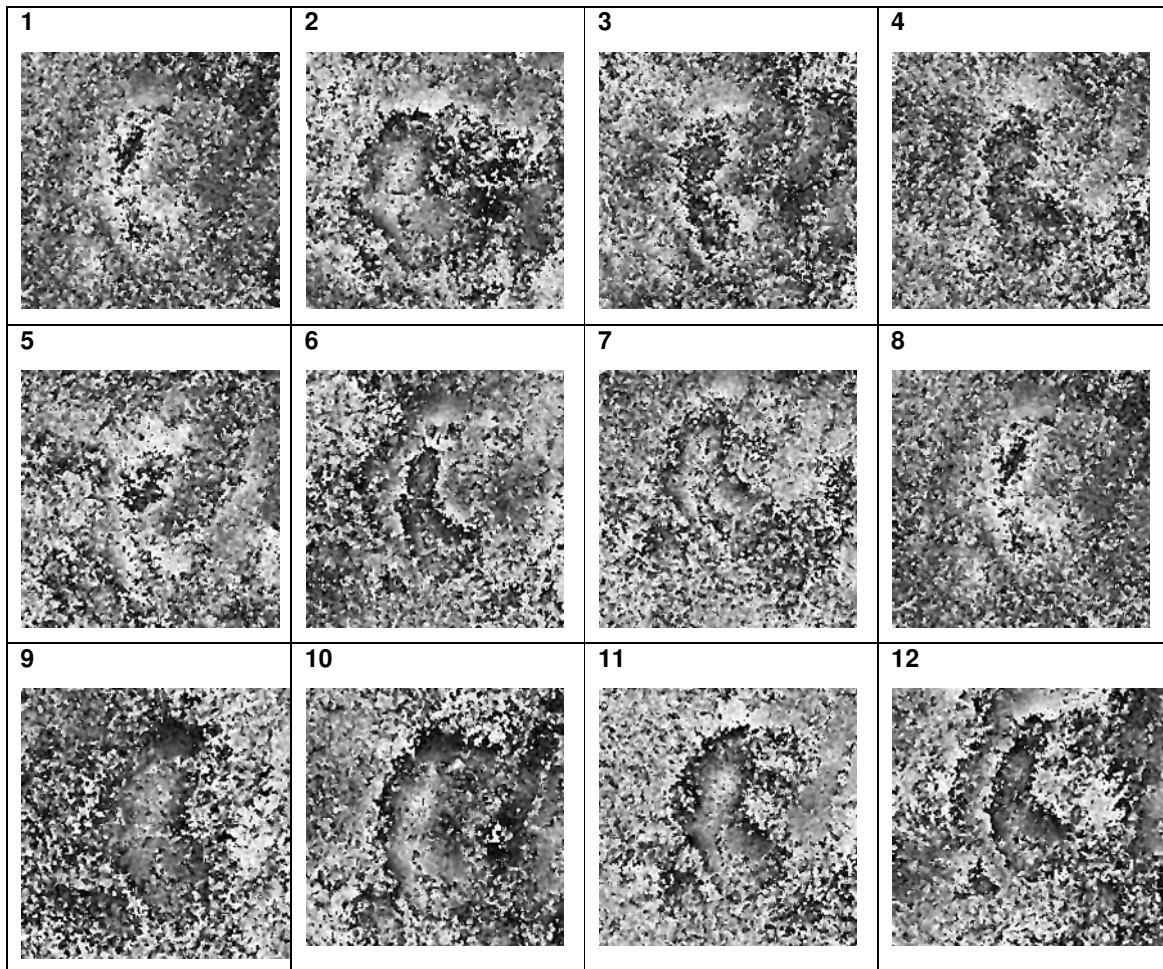


Figure 14 - Interférogrammes Radarsat-1 sur la ville de Manaus, en détail l'AMC. Les couples sont identifiés par les nombres correspondant sur le Tableau 2.

ID	Image 1	Image 2	Baseline Temp (jours)	Baseline Perp (m)
1	20060812	20071111	456	-36,8047
2	20060929	20070409	192	-197,6499
3	20060929	20070527	240	-117,4715
4	20060929	20070714	288	-272,0721
5	20061023	20071018	360	-95,3590
6	20061023	20071205	408	-41,5777
7	20061116	20070807	264	-375,1935
8	20061116	20070924	312	-211,5787
9	20061116	20071018	336	-52,1265
10	20061116	20071205	384	8,0450
11	20061210	20071111	336	-208,7636
12	20070807	20070924	48	165,3798

Tableau 2 – Les colonnes représentent l’index, les dates des images qui forment les couples, les valeurs de *baseline* temporelle et perpendiculaire.

3.2.1 Analyse statistique du motif AMC

L'analyse statistique comprend une analyse de deux régions appelées ROI1 et ROI2, respectivement, le motif AMC (en portugais *área de movimento crustal*) et ses environs (la région autour de la bulle) où il a été supposé qu'il n'y a pas de déformation de terrain. Pour la détermination de la ROI2, la connaissance du cadre géologique et géomorphologique

étudié par Ramos (2009) a été considérée. La

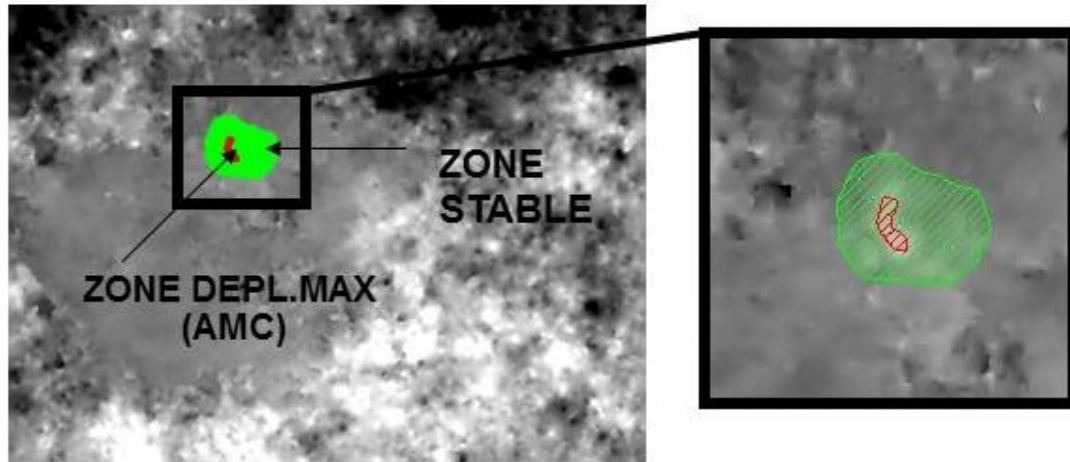


Figure 15 montre l'emplacement des 2 zones sur l'interférogramme final.

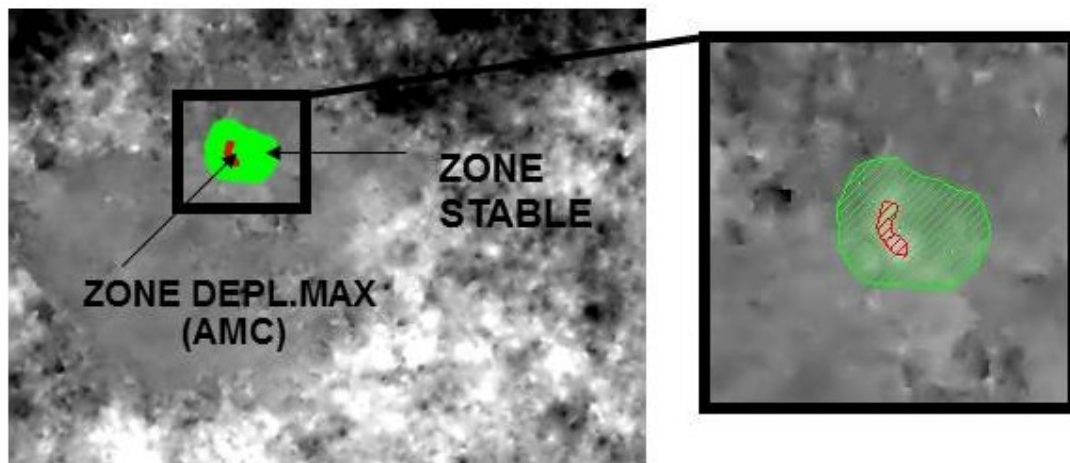


Figure 15 – Localisation des ROIs 1 et 2 sur l'interférogramme final. La zone en rouge représente l'AMC et la région en vert la zone stable de référence.

Après déroulement des franges, nous avons calculé la moyenne, l'écart type, les valeurs minimales et maximales en radians pour les deux zones, (cf. Tableau 3). Par la suite, la différence entre les valeurs maximales de ROI1 et la moyenne de ROI2 a été calculée pour dériver la différence de phase, en considérant que la ROI2 est stable.

Ainsi, nous avons obtenus des valeurs de phase interférométrique finale en radians pour les 20 couples analysés. Plus tard, les valeurs en radians (phase) ont été converties en centimètres pour quantifier la déformation du terrain. Le Tableau 3 montre le résultat final pour les 20 paires analysées.

Image 1	Image 2	Max (ROI1)	Moyenne (ROI2)	Écart Type	Déformation radians	cm	Présence de l'AMC
20060812	20061210	-0.49	-4.19	2.61	3.70	1.65	Non
20060812	20071111	2.46	-6.75	1.92	9.21	4.11	Oui
20060929	20070409	9.34	4.84	1.41	4.50	2.01	Oui
20060929	20070527	7.08	2.44	1.31	4.64	2.07	Oui
20060929	20070714	7.00	0.74	2.9	6.26	2.79	Oui
20061023	20061116	-2.84	-2.98	2.19	0.14	0.06	Non
20061023	20071018	-1.97	-2.07	2.5	7.02	2.70	Oui
20061023	20071205	1.53	-5.41	2.22	6.94	3.09	Oui
20061116	20070807	8.47	2.12	1.81	6.35	2.83	Oui
20061116	20070924	12.17	6.73	1.63	5.44	2.43	Oui
20061116	20071018	0.49	-4.86	2.72	5.35	2.39	Oui
20061116	20071205	5.54	-0.88	1.64	6.42	2.86	Oui
20061210	20071111	6.59	-0.73	1.68	7.32	3.26	Oui
20070409	20070527	6.16	4.78	0.86	1.38	0.62	Non
20070409	20070714	-1.25	-2.86	1.33	1.61	0.72	Non
20070527	20070714	2.12	1.3	1.43	1.61	0.72	Non
20070807	20070924	3.26	2.19	1.83	1.07	0.48	Oui
20070924	20071018	-6.21	-6.37	2.04	0.16	0.07	Non

Tableau 3 - Dates des images des couples interférométriques, valeur maximale de ROI1 et moyenne de ROI2, écart type, phase interférométrique final en radians et cm. Présence ou non du motif AMC.

Les valeurs de l'écart type de la phase interférométrique pour chaque couple peuvent être considérées comme le degré d'incertitude des mesures. Les valeurs moyennes de ROI2 représentent la surface de référence. Les valeurs de déformation sont relatives à cette

référence. La conversion entre les valeurs en radians et en cm est effectuée à partir de la relation : $\frac{\text{radians} \times \lambda}{2\pi}$

3.2.2 Discussion finale et perspectives

Comme indiqué précédemment, les couples sélectionnés où apparaît le motif d'AMC constituent un ensemble de 12 interférogrammes formés à partir de 13 dates indépendantes, il est donc peu probable qu'un événement d'origine atmosphérique puisse se répéter au moins dans 13 dates différentes et créer un motif similaire de même signe, sur la même longueur et au même 'emplacement. La Figure 16 présente un graphique qui montre les 12 paires interférométriques colorées selon la légende de mesure de déformation (en cm). Les valeurs de base perpendiculaire (axes-y) et les dates des images qui forment les paires (axe x) sont représentées par des petits carrés bleus.

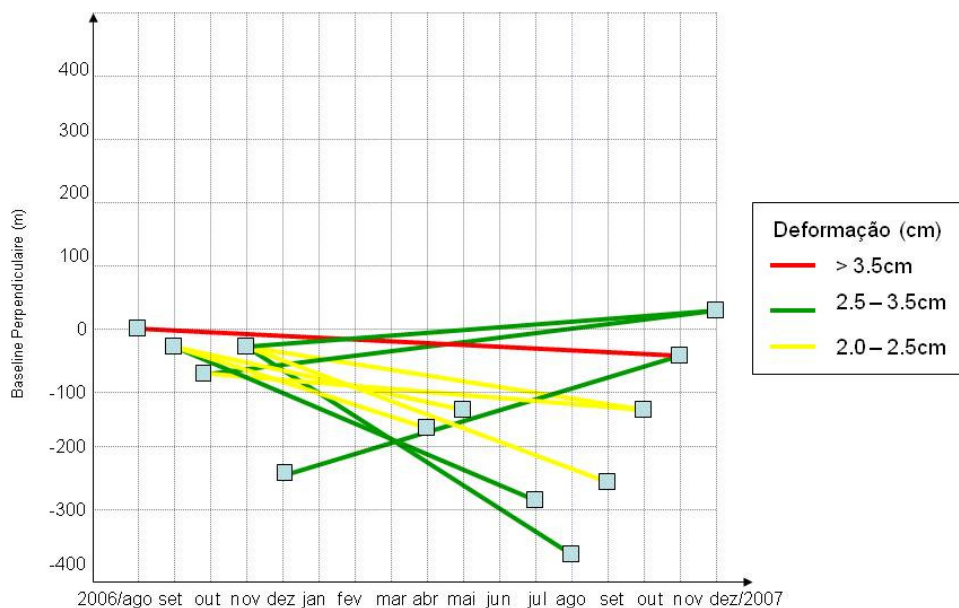


Figure 16 – Valeurs de déformation pour l'interférogrammes Radarsat-1 de Manaus.

Selon le tableau ci-dessus, il est possible d'observer un type de mouvement lent et graduel dans la région étudiée, où le couple de plus grande *baseline* temporelle (entre août 2006 et novembre 2007) a la plus grande valeur de déformation du terrain (4,11 cm). Les données

hydrologiques sur le système des fleuves Negro, Solimões et Amazonas (CPRM, 2008) ont été comparées au cours de la période Août 2006 à Décembre 2007 afin d'examiner une éventuelle relation entre le mouvement de la croûte et les inondations de la rivière.

Une partie de cette étude a été inclus dans la publication de la Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection, de la Société française de photogrammétrie et de télédétection publiée en Mars 2012 (Ramos, Miranda et al. 2012).

4 PTI (*Point Target InSAR*) appliqué sur les données Radarsat-2 : l'approche *Dual-Scale Network Analysis* et ses résultats

L'objectif de ce chapitre est d'introduire les concepts de PTI (*Point Target Interferometry*) et décrire l'approche *Dual-Scale Network Analysis* qui est basée sur la méthode *dual-scale PSI* publiée par Rabus et Ghuman (2009).

La chaîne de traitement appelée *Dual-Scale Network Analysis* a été développée par l'entreprise canadienne 3vGeomatics qui a permis son application à la pile de 24 images du satellite Radarsat-2 obtenue entre les années 2008 et 2010, afin de vérifier et mesurer l'existence d'une zone de mouvement de la croûte sur la ville de Manaus, identifiée dans l'étude antérieure en utilisant la technique DInSAR sur les données Radarsat-1.

4.1 Identification des cibles stables (*Point Targets*) en imagerie SAR

Dans la technologie InSAR, la surveillance d'une cible donnée sur le terrain dépend de la stabilité de réflexion des échos au satellite radar sur un minimum de deux acquisitions d'image. Par conséquent, l'InSAR est basée sur l'identification de cibles avec un signal stable dans le temps. Les types des cibles peuvent être regroupés en différentes catégories, comme suit:

- ✓ ***Point Target (PT)*** ou cible ponctuelle est un pixel de l'image SAR dominé par un objet unique qui comprend individuellement le signal de retour. Les PTs sont idéals pour la surveillance continue dans le temps de déplacement du sol avec une précision millimétrique. Ces cibles ponctuelles sont omniprésentes dans les milieux urbains contenant des façades d'immeubles, lampadaires et d'autres superstructures.
- ✓ ***Distributed Target (DT)***² ou cible répartie est un pixel de l'image SAR qui n'est pas dominé par un seul objet, mais contient de nombreux sous-objets qui contribuent collectivement à l'écho radar. Le signal d'un DT est une composition des signaux des sous-objets. Il est généralement moins stable entre différentes acquisitions, d'une part car les sous-objets ont plus de chance d'évoluer dans le temps (en réponse et en position relative), et d'autre part leur répartition spatiale induit une décorrélation

² *Distributed Target (DT)* est synonyme de *Distributed/Extended Scatterer (DS, ES)*

supplémentaire lorsque la base perpendiculaire augmente. Les DTs peuvent également être utilisés pour les mesures temporellement continues de déplacement du sol, mais avec une erreur supérieure à celle des PT. En revanche, la densité des DTs sur un terrain naturel est beaucoup plus élevée que celle des PTs.

- ✓ **Seasonal Target (ST)** ou cible saisonnière est défini comme un PT ou DT qui ne renvoie un signal stable au satellite que par intermittence ou de façon périodique. Par exemple, une structure de base peut être exposé durant les mois d'été, mais obscurci par la neige pendant l'hiver. Le déplacement pour les STs peut être caractérisé pour chaque période consécutive au cours de laquelle ils sont stables. En raison de l'invisibilité temporelle récurrente (ou l'instabilité) des ST, leur précision de mesure est inférieure à celle des DTs pures sans éclipses. La plupart des méthodes InSAR ignorent les STs parce qu'ils ne sont pas continuellement stables dans le temps.

De nombreuses méthodes ont été développées afin d'identifier les *Point Targets* dans une pile d'images SAR recalées. Les principales méthodes existantes sont :

1. **Mean Sigma Ratio (MSR)** (Werner, Wegmuller et al. 2003) : les pixels PT ne présentent pas le *speckle* associé aux DTs, puisque la diffusion d'un PT est attribuable à une seule cible localisée qui est dominante dans sa cellule de résolution. L'intensité de rétrodiffusion d'un PT reste pratiquement invariée quand on observe sous des angles d'incidence légèrement différents correspondant à une ligne de base perpendiculaire non nulle entre deux acquisitions SAR. Inversement, la rétrodiffusion d'un DT fluctue fortement en raison de ces petits changements dans l'angle d'incidence au fil du temps. Par conséquent, les PTs peuvent être distingués des DTs en identifiant des pixels ayant une faible dispersion d'amplitude, c'est à dire un faible écart type de rétrodiffusion par rapport à la rétrodiffusion moyenne. Cette technique est appropriée pour identifier les candidats PTs sur les grosses piles d'images (≥ 30 acquisitions) recalées, mais fonctionne mal pour les piles plus petites. En outre, la technique MSR est bien adaptée pour identifier les PTs lumineux correspondant à des structures artificielles, mais n'a pas de succès avec les diffuseurs de faibles SNR qui peuvent encore avoir des valeurs de phase stables.
2. **Spectral diversity** ou diversité spectrale (Scheiber and Moreira 2000) : comme l'intensité et la phase d'un pixel PT est directement dépendante de la RCS (*Radar Cross Section*) et de l'emplacement d'une cible unique dominante, l'intensité de la rétrodiffusion est presque constante lors du traitement de différents *looks* spectrales

obtenus en fractionnant la largeur de bande en azimut (sous ouvertures) ou en distance. Par conséquent, les pixels avec une faible diversité spectrale peuvent être identifiés dans une seule image SAR. De plus, la diversité spectrale des images SAR recalées peut être cumulée en vue d'identifier les pixels qui présentent toujours une faible diversité spectrale dans le temps. Cette technique identifie avec succès les PTs avec les caractéristiques inhérentes des cibles ponctuelles, même dans des piles relativement petites d'images SAR (≥ 12 acquisitions). Contrairement à le MSR, cette technique est moins biaisée vers la haute rétrodiffusion de PTs telles que les structures urbaines, et identifie aussi des pixels sombres qui sont dominés par une seule cible.

3. **Phase Stability** ou Stabilité de phase (Hooper, Zebker et al. 2004) : comme on s'attend que la phase des pixels PT soit stable au cours du temps, la stabilité de phase fournit un critère naturel pour l'identification des candidats PTs. Les interférogrammes sont formés à partir d'une pile d'images SAR recalées, et la phase topographique est estimée et éliminée à l'aide d'un DEM externe. La phase résiduelle est modélisée comme une superposition de contributions de phase en raison du déplacement de terrain et des incertitudes dues aux orbites, à l'atmosphère, aux erreurs de DEM, et au bruit. Chaque contribution de phase, sauf le bruit, est modélisée et retirée en utilisant les statistiques spatio-temporelles particulières qui correspondent à la longueur de corrélation spatiale, la dépendance à la ligne de base perpendiculaire, ou la cohérence temporelle. Enfin, le terme de bruit est estimé et les pixels PTs sont sélectionnés quand le bruit de phase est suffisamment petit. Cet algorithme utilise initialement le MSR pour identifier les candidats PTs, et rejette de manière itérative les PTs qui contiennent le plus de bruit. L'algorithme de stabilité de phase est bien adapté à l'identification de PTs parce que le but de la technique PTI est de surveiller de manière fiable un déplacement temporel lisse/graduel. La fidélité de la technique PTI repose sur l'identification réussie de pixels avec un faible bruit de phase.

4.2 Concepts et étapes du traitement *Dual-Scale Network Analysis*

L'approche appelée *Dual-Scale Network Analysis* a l'objectif de décontaminer itérativement la phase, en élevant les contributions qui altèrent la mesure pour arriver à la cartographie précise des zones de déplacement.

La chaîne de traitement appliquée sur les données Radarsat-2 peut être comprise à partir de l'exploitation d'un réseau volumineux de données (*Réseau InSAR*) bien connectées et

précisément corrigées et référencées (*2D stack processing*) qui permet la détection et l'interprétation du signal de déplacement sur différentes échelles spatiales pour arriver aux séries temporelles historiques du mouvement du terrain.

Dans cette section, nous présentons les principes de la méthodologie et montrons ensuite les étapes et résultats.

4.2.1 Réseau InSAR (*Network InSAR*)

Semblable à d'autres approches SBAS (Berardino, Fornaro et al. 2002) (Hooper 2008), la technique de réseau (*network*) InSAR est basée sur la génération de tous les interférogrammes viables, et ils sont traités indépendamment puis inversés, de façon collaborative afin d'atténuer le bruit et maximiser le rapport *signal-to-noise-ratio* (SNR). La

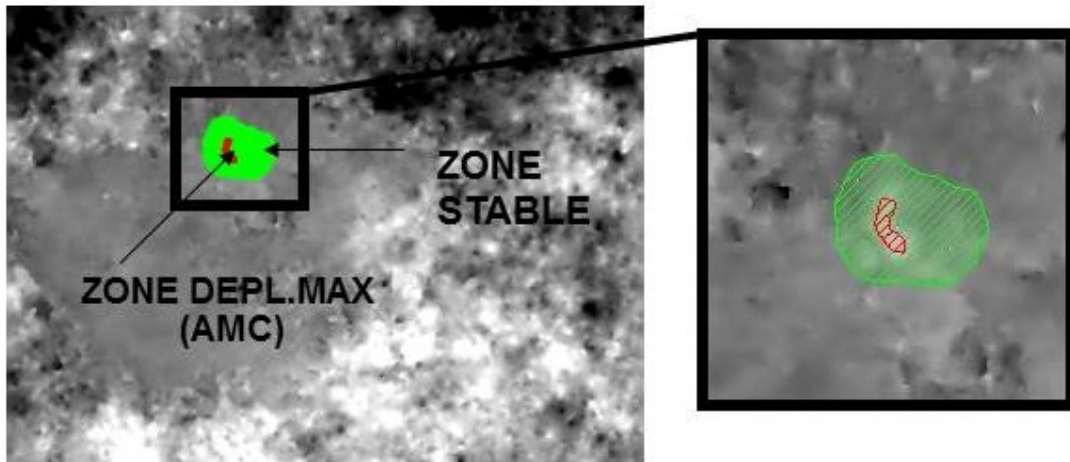


Figure 15 illustre le schéma du réseau pour l'ensemble de données InSAR à Manaus, où les carrés gris représentent des images radar et les arcs représentent les interférogrammes colorés selon leur valeur respective de cohérence.

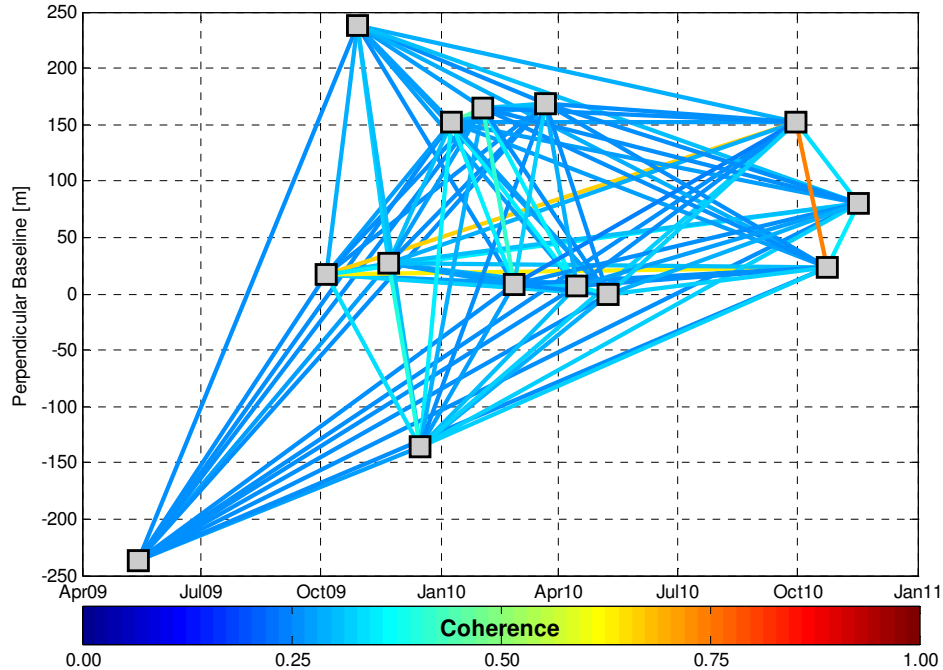


Figure 17 – Exemple de diagramme de Réseau InSAR sur la pile Radarsat 2 de Manaus.

La formation de tous les interférogrammes possibles augmente considérablement le nombre de possibilités pour obtenir des données cohérentes. En outre, les interférogrammes de grande cohérence peuvent être privilégiés en les pondérant plus favorablement au cours de l'inversion.

En utilisant tous les interférogrammes possibles, il est possible d'améliorer considérablement le SNR du signal de déplacement. Le réseau InSAR bénéficie également de la décontamination de phase, car une meilleure décomposition statistique est possible après le réhaussement de la qualité de phase. Le raffinement des informations orbitales est également amélioré parce que plusieurs corrections de *baseline* peuvent être combinées pour obtenir les vraies orbites.

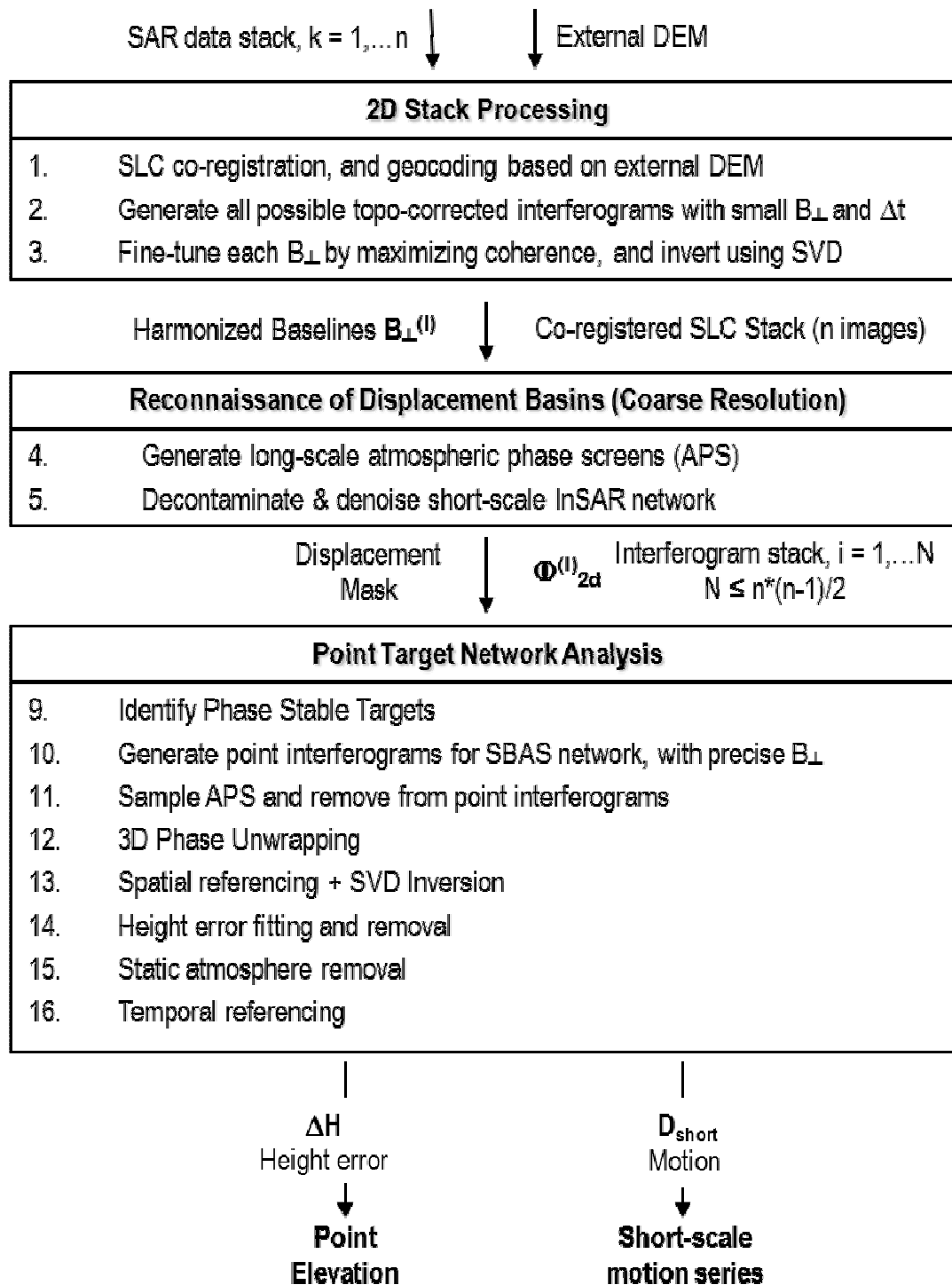
4.2.2 Dual-Scale Network Analysis

Les techniques traditionnelles PTI exigent un volume élevé (~ 30 acquisitions) d'images SAR, et aussi une modélisation (linéaire, non-linéaire, sinusoïdale, etc.) pour séparer les trois principales composantes de phase: l'atmosphère, l'erreur de hauteur (ou l'erreur du MNT), et le mouvement (Werner, 2003). De cette façon, elles peuvent être difficiles à automatiser, sujettes à des erreurs de l'opérateur et biaisées vers des modèles de phase

hypothétiques. Comme déjà indiqué, la chaîne *Dual-Scale Network InSAR* est basée sur la méthode *Dual – Scale PSI* publiée par Rabus et Ghuman, 2009. Les techniques de Réseau InSAR ont été intégrées dans le Dual-Scale PSI pour caractériser les mouvements de terrain avec moins de bruit et une plus grande fiabilité statistique.

Pratiquement, on utilise l'information différentielle produite par le « *2D stacking processing* » pour faire tourner l'analyse dans l'échelle pleine ou ponctuel (*Point Target*) en arrivant à l'identification de déplacement de terrain.

En outre, les PTs sont analysés pour obtenir plus de détails spatiaux. La décontamination de phase et la réduction de bruit sont appliquées de façon itérative par trois fois en même temps que la résolution augmente pour cartographier, avec précision, l'évolution spatio-temporelle du déplacement du sol. Un bref résumé de la méthodologie de *Dual-Scale Network Analysis* est montré dans l'organigramme illustré dans la Figure 18. Les étapes sont résumées dans les sections suivantes.

Figure 18 – La chaîne de traitement *Dual-scale PTI Network Analysis*.

Traitement 2D Stack

Après le traitement des données originales SAR et l'enregistrement des images, la phase interférométrique est évaluée pour toutes les combinaisons des couples maître-esclave en utilisant une faible résolution. Les interférogrammes qui présentent une décorrélation temporelle ou spectrale significative sont éliminés. Chaque interférogramme a la topographie corrigée à l'aide d'un MNT externe, et les lignes de base géométriques sont affinées en utilisant une approche de maximisation de la cohérence. Le réseau des lignes de base est corrigée et harmonisée avec la méthode SVD (*Singular Value Decomposition*) pour générer des orbites précises pour chaque scène.

Reconnaissance des zones de déplacement

Les effets atmosphériques de longue échelle sont représentés par les APS (*Atmospheric Phase Screen*), ces derniers sont générés et supprimés de chaque interférogramme. Chaque couple InSAR est filtrée spectralement et déroulé spatialement. Le réseau des interférogrammes déroulés est inversé de façon à générer un interférogramme de bruit réduit représentatif de chaque date. Les contributions relatives à l'atmosphère statique, l'erreur de hauteur, et l'atmosphère de courte échelle sont modélisées et enlevées. Toutes les zones de déplacement sont masquées et ont un traitement spécial dans la suivi des étapes. Les données de terrain sont également une entrée pour identifier les zones de déplacement.

Point Target Network Analysis

La dernière étape s'appuie sur l'identification de PTs sur la base de données en considérant la petite diversité spectrale du pixel et la stabilité de phase temporelle. Puis, le réseau des interférogrammes ponctuels sont générés. Chaque point dans un interférogramme est démodulé en utilisant les modèles déjà générés relatifs à : l'atmosphère (APS), l'élévation du terrain et le déplacement. Le réseau ponctuel de phase résiduelle est spatialement déroulé et inversé en utilisant une SVD. L'atmosphère statique, l'erreur de hauteur, et l'atmosphère de courte échelle sont réorganisées de manière à éliminer les sources de contamination résiduelle. Les historiques de la phase finale sont spatialement référencés à

un ensemble de points à l'extérieur des zones de déplacement (c'est à dire en zone stable), et dans le temps sont référencés par rapport à la première scène.

Pour résumer, les perturbations de phase sont modélisés de manière itérative et retirées à des résolutions spatiales de plus en plus élevés, résultant finalement en cartes de déplacement à pleine résolution. Le *Multilooking* des interférogrammes supprime le bruit à partir de la moyenne spatiale, ce qui bénéficie aux algorithmes sensibles au bruit comme le déroulement de phase et la modélisation statistique des perturbations. Une fois qu'un modèle grossier pour chaque perturbation a été obtenu, le bruit supplémentaire peut être introduit par le passage à une résolution plus élevée. A chaque étape, l'augmentation du bruit est compensée par l'amélioration de la qualité des modèles constitutifs de phase, ce qui conduit à des résidus de phase progressivement en décomposition qui peuvent encore être déroulés et remodelés de manière fiable. Il est possible d'incorporer des itérations supplémentaires à des résolutions intermédiaires, mais notre expérience a montré qu'une solution convergente est obtenue avec les trois itérations présentées dans la Figure 18.

Enfin, les PTs sont géocodées, et les historiques de phase correspondants sont convertis en déplacement le long de la ligne de visée (LOS – *Line of Sight*). La série temporelle de déplacement LOS est projetée dans une direction géotechnique propre, et est exporté pour la visualisation et l'interprétation. L'interprétation et la détermination de la direction du mouvement est généralement un processus de collaboration entre experts du domaine. Dans cette étude, les résultats InSAR ont été intégrés à l'expertise géologique. L'analyse *Dual-scale* PTI a été appliquée avec succès pour mesurer le déplacement de la surface sur la ville de Manaus comme sera vu en suite sur la section de résultats.

Déroulement de phase 3D

Après le déroulement de phase, les interférogrammes déroulés sont inversés pour produire les résultats finaux. De cette façon, le déroulement de phase peut être considéré comme l'étape clé dans l'ensemble du processus, car toute l'erreur introduite à ce moment sera directement transmise dans la mesure finale.

Lors du traitement de séries temporelles InSAR, le déroulement de phase peut être traité comme un problème 3-D (la troisième dimension est celle du temps) par opposition à une série indépendante de problèmes 2-D. Cela conduit à une amélioration de la précision de la solution de manière similaire à ce que le déroulement 2-D offre comme amélioration par

rapport aux méthodes 1-D (Hooper and Zebker 2007). Les algorithmes de déroulement de phase développés pour les ensembles de données 3-D sont généralement basés sur l'hypothèse que la différence de phase entre les points voisins d'échantillonnage dans n'importe quelle dimension est généralement inférieure à la moitié d'un cycle de phase (Huntley 2001). Toutefois, dans le cas de séries temporelles InSAR ce n'est généralement pas le cas dans la dimension temporelle. C'est principalement en raison des différences de retard atmosphérique, qui varient généralement de plus d'un demi-cycle de phase sur une image (Hooper and Zebker 2007). La déformation, aussi, peut conduire à des sauts supérieurs à un demi-cycle.

Ici, nous utilisons le fait que la différence de phase entre un point d'échantillonnage et un point d'échantillonnage à proximité est susceptible de varier de moins d'un demi-cycle entre les acquisitions ultérieures, car la contribution de signaux spatialement corrélées entre les points proches dans l'espace est généralement faible. Nous nous référons à cette différence de phase comme un "gradient de phase". Le problème de déroulement de phase 3-D est compris comme une série d'estimation 2-D de maximum de probabilité a posteriori (MAP) avec des fonctions de densité de probabilité (PDF) a posteriori estimées en utilisant la troisième dimension du temps.

La probabilité a posteriori pour chaque gradient de phase déroulée dans chaque interférogramme est estimé comme le produit de la fonction de vraisemblance pour la phase déroulée, compte tenu de la valeur enroulée, et d'une probabilité a priori pour le gradient de phase déroulée (règle de Bayes). Un programme d'optimisation est ensuite utilisé pour rechercher la solution qui maximise la probabilité a posteriori pour chaque interférogramme.

4.3 Résultats

L'objectif de cette section est de montrer les résultats obtenus dans les étapes de traitement résumés dans la Figure 18, c'est à dire : le traitement *2D Stack*, la détection des zones de déplacement et l'analyse de *Point Target* décrites au-dessus.

Ces résultats de Manaus ont été générés à l'aide d'une pile de 24 *Fine* images du satellite RADARSAT-2. En interférant chaque image avec les autres, un total de 244 interférogrammes était possible et les paires excessivement décorrélés ont été ignorés. Cela représente environ 12 mesures indépendantes pour chaque date (traditionnellement, un seul

coup d'œil par date est utilisé). Le volumineux réseau InSAR a été inversé simultanément pour obtenir l'historique des mouvements au sol en chaque cible. Une comparaison visuelle par date permet d'observer la réduction significative du bruit obtenue par l'exploitation statistique de la redondance inhérente au réseau InSAR.

La Figure 19 illustre la carte de déplacement accumulé générée sur la ville de Manaus. La principale zone de déplacement a été identifiée, en confirmant les résultats préliminaires obtenus par l'analyse Radarsat-1. Les experts de géologie impliqués dans ce projet ont conclu que la zone de subsidence est probablement associée à une anomalie de drainage (située à côté du motif), alors que le soulèvement du fleuve dans la période d'inondation peut représenter l'origine du mouvement.

Les sections suivantes vont montrer les résultats intermédiaires générés dans les étapes différentes mais qui contribuent à la précision et fidélité des résultats finaux.

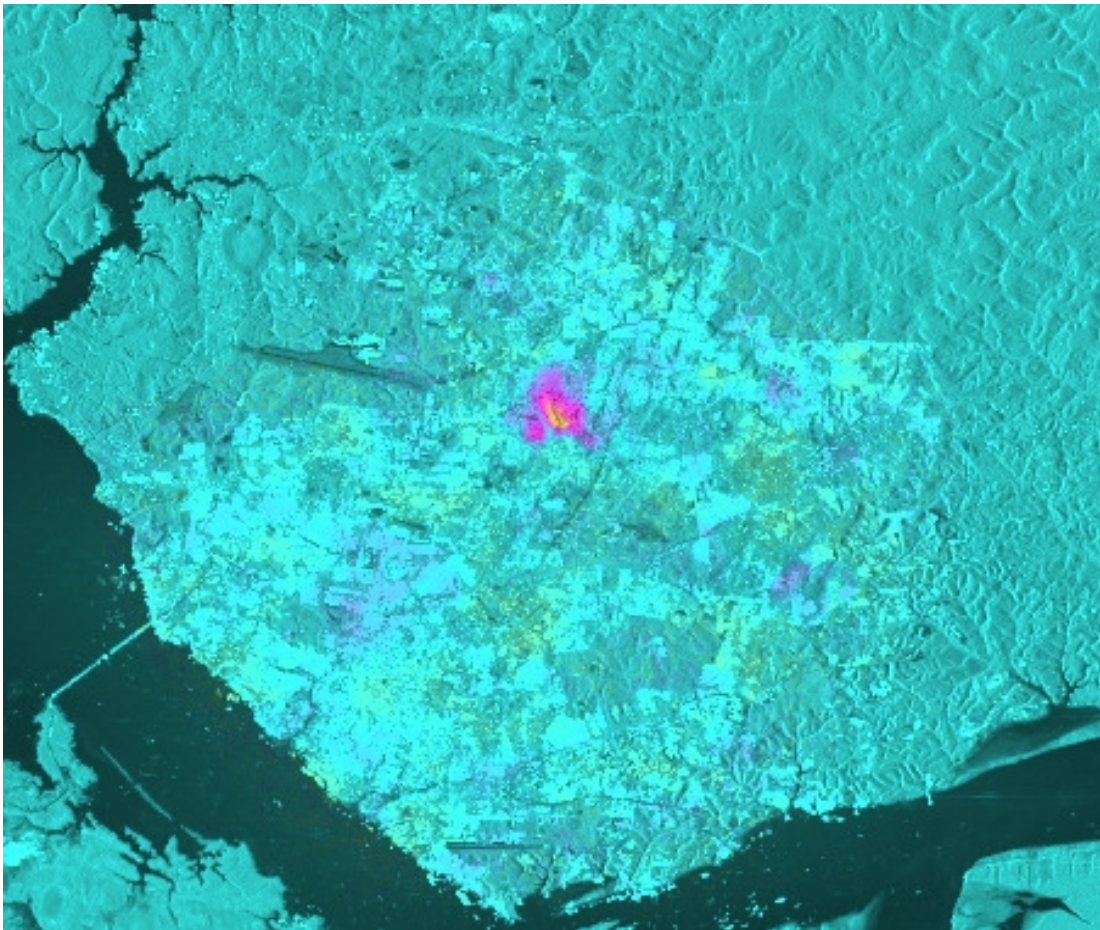


Figure 19 – Carte de déplacement accumulé sur la ville de Manaus.

4.3.1 Données initiales, recalage et *geocoding*

Pour cette étape, nous utilisons les 24 images du satellite RADARSAT-2 au format *Single Look Complex* couvrant la région de Manaus et le Modèle Numérique de Terrain (SRTM) correspondant à la même région. Les informations d'orbites précises pour les images SLCs ont été téléchargées sur le site de MDA.

La première tâche du traitement consiste à enregistrer/recaler les images SLC en pleine résolution, en préparation pour les différentes étapes de traitement. Comme les images SLC n'ont pas exactement la même taille, les offsets sont estimés et un polynôme est utilisé pour recaler les images esclaves à une image maître choisie dans la moitié de la pile d'images. Pour la pile de Manaus, l'image acquise en 15 juillet 2009 a été sélectionnée comme maître. Ceci est basé sur des techniques de corrélation bien établies. La Figure 20 montre l'intensité moyenne de toutes les SLC recalées dans la géométrie RDC (*Range Doppler Coordinates*). Les zones noires qui bordent l'extérieur à droite représentent des lignes des données qui sont nulles, c'est à dire, qui ne sont pas présentes dans chaque scène en raison du décalage de localisation des images.

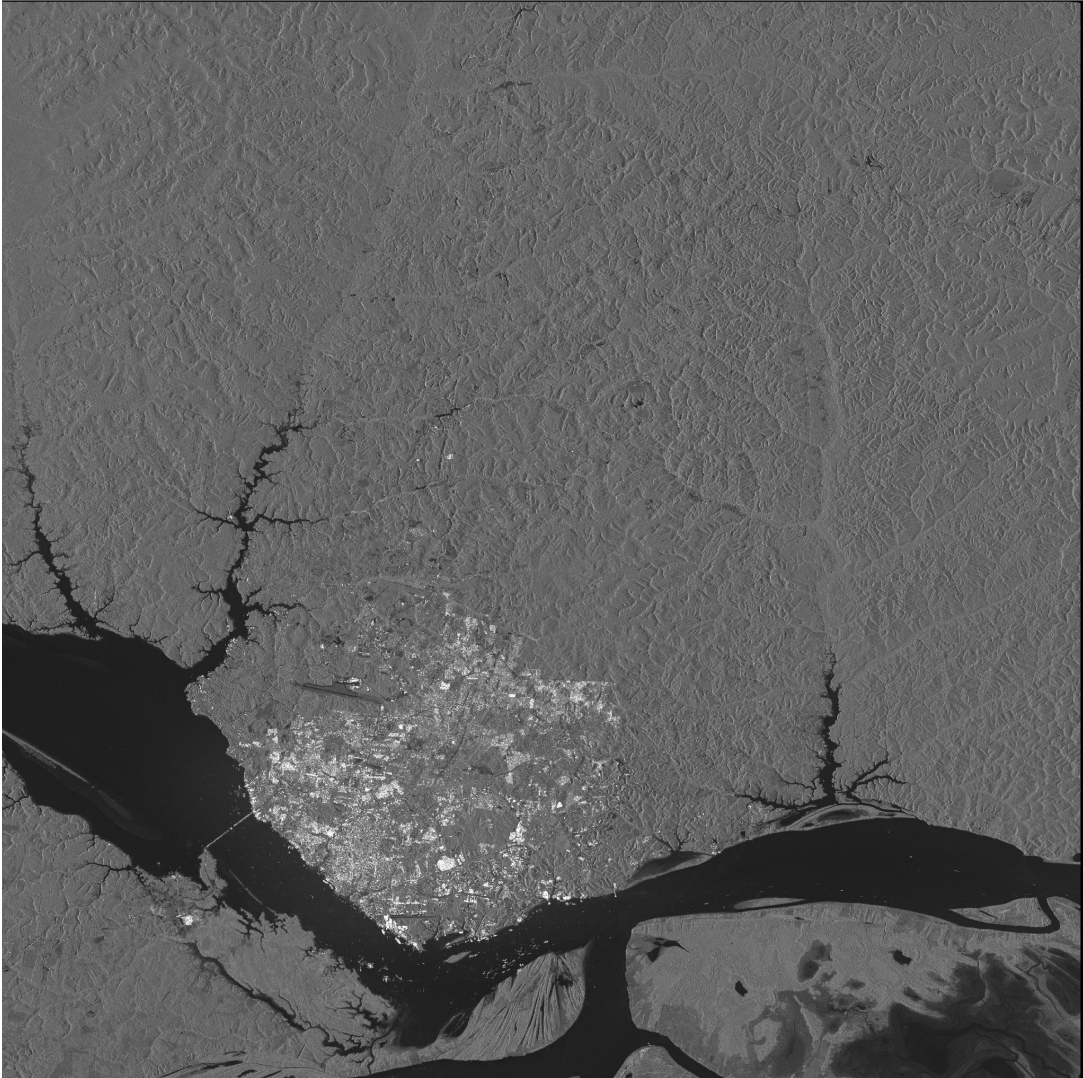


Figure 20 – Amplitude moyenne de toutes les images SLC recalées dans la géométrie RDC. Pour l'étape de *Geocoding* le MNT a été transformé à la géométrie de RDC, et recalés avec l'image d'amplitude SAR moyenne.

La Figure 21 donne un aperçu des principales étapes du traitement du MNT. En A, le MNT SRTM original; En B, les données ont été transformées et ré-échantillonnées en géométrie RDC; La Figure C montre le MNT coloré à 100m par frange, ce qui est analogue à des courbes de niveau. En D, l'objectif principal est de décrire la transition entre la géométrie terrain et la géométrie RDC qui peut être utilisée dans le traitement pour la génération de cartes finales, par exemple. L'image D montre la moyenne d'amplitude en coordonnées géographiques.

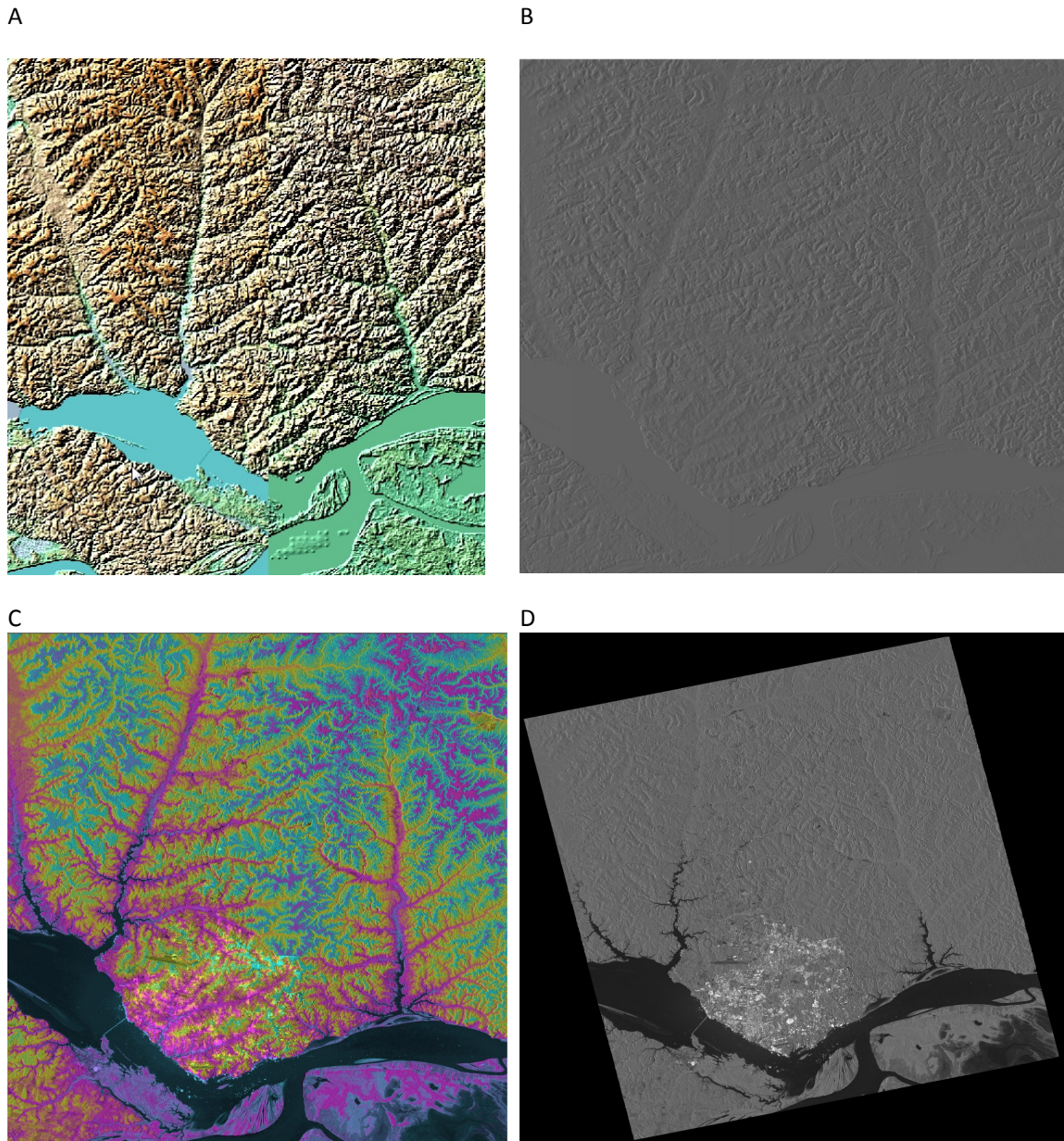


Figure 21 – Passage du MNT en géométrie radar et de l'amplitude moyenne en géométrie terrain.

4.3.2 Correction de ligne de base géométrique (*baseline*)

La distance entre les positions du satellite RADARSAT-2 au moment de l'acquisition d'un couple est connu simplement comme ligne de base (*baseline*), et la composante perpendiculaire à la visée conditionne la sensibilité à la hauteur dans les échelles d'interférogramme. Alors que les lignes de base établies à partir de données précises

d'orbite sont exactes selon les normes modernes, elles sont encore sous-optimales pour l'étude de déplacement en utilisant l'InSAR.

De la pile de 24 scènes SAR, 244 couples sont possibles. Toutes les 244 interférogrammes sont formés, la contribution de phase du MNT est soustraite, et la phase est déroulée après un filtrage spectral fort. La phase déroulée est spatialement échantillonnée et les tendances de phase de longue échelle sont inversées pour corriger les composants de ligne de base. La Figure 22 montre les mêmes interférogrammes avant (à gauche) et après (à droite) la correction de base ; les franges erronées des images à gauche sont la phase de la terre plate résiduelle, et aussi la conséquence de l'estimation de *baselines* inexactes.

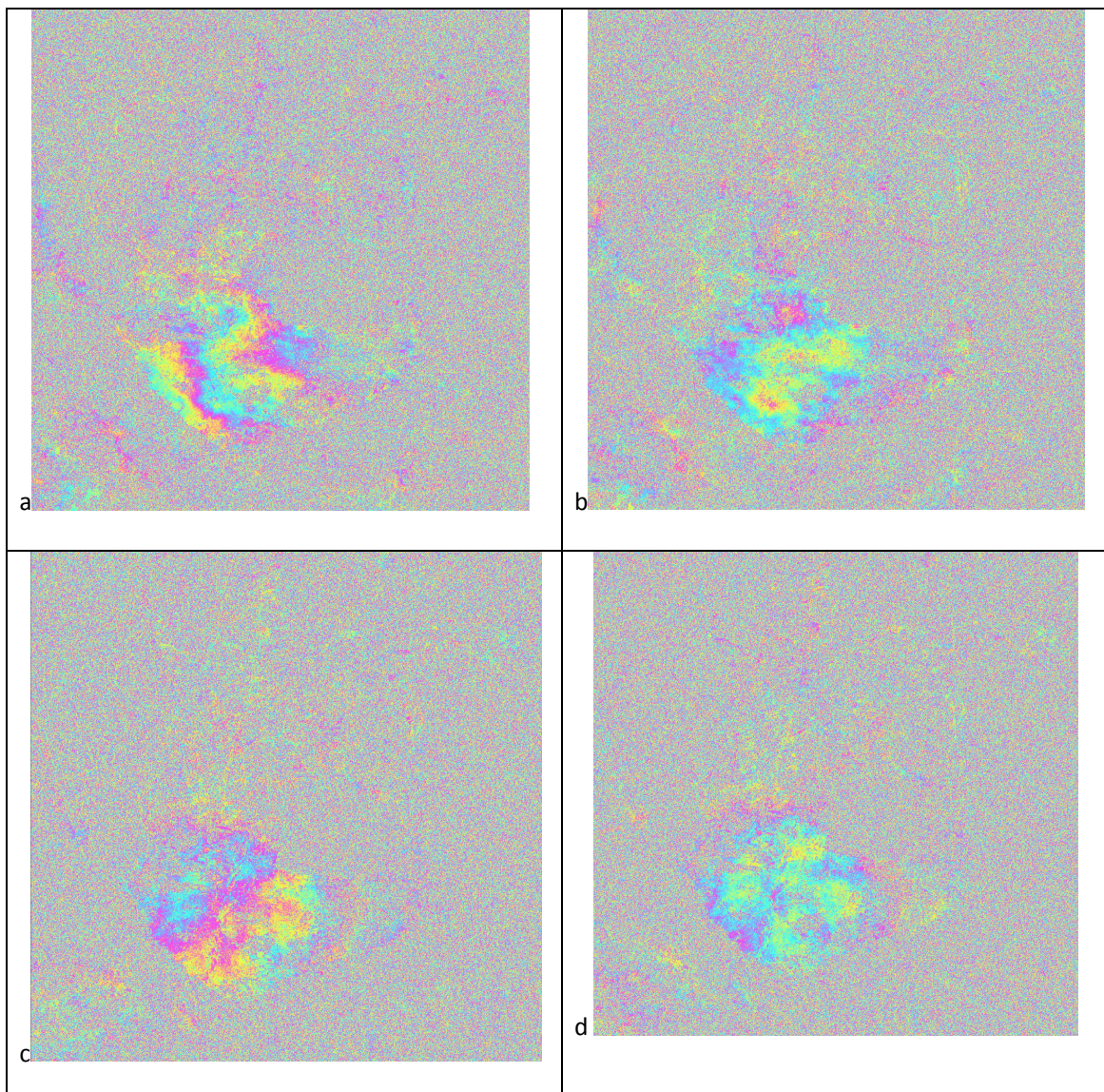


Figure 22 – (a) et (b) représentent les couple 20081024 – 20111017 avant et après la correction de ligne de base, de même pour (c) et (d) avec le couple 20100429-20100523.

Le réseau de lignes de base peut maintenant être inversé en utilisant la décomposition en valeurs singulières (SVD). L'algorithme SVD permet d'extraire la redondance du réseau, tel que le réseau de l'ensemble des lignes de base possibles, et calculer une valeur unique pour chaque scène, par rapport à la moyenne dans le temps du réseau. Cela devient utile plus tard lorsque les données interférométriques sont également inversées.

4.3.3 Suppression de la phase atmosphérique à longue échelle

Une perturbation majeure dans les interférogrammes est le retard de phase spatiale non homogène causé principalement par la vapeur d'eau dans la troposphère; ces variations se produisent généralement à méso-échelle (2-20 km). Les écrans de phase atmosphérique appelés dans cette étude de APS (*Atmospheric Phase Screen*) sont générés en utilisant un filtre spatial pour grande longueur d'onde. Les changements de phase par rapport à une courte échelle sont conservés, car ils pourraient représenter le signal de déplacement. La Figure 23 montre un interférogramme enroulé avant et après la soustraction de phase atmosphérique à longue échelle. Le changement de la couleur de fond (rose / jaune au bleu) est dû à la soustraction de la constante arbitraire de phase globale de l'interférogramme. Les perturbations restantes représentent l'atmosphère statique, l'erreur de hauteur, et une atmosphère de petite échelle.

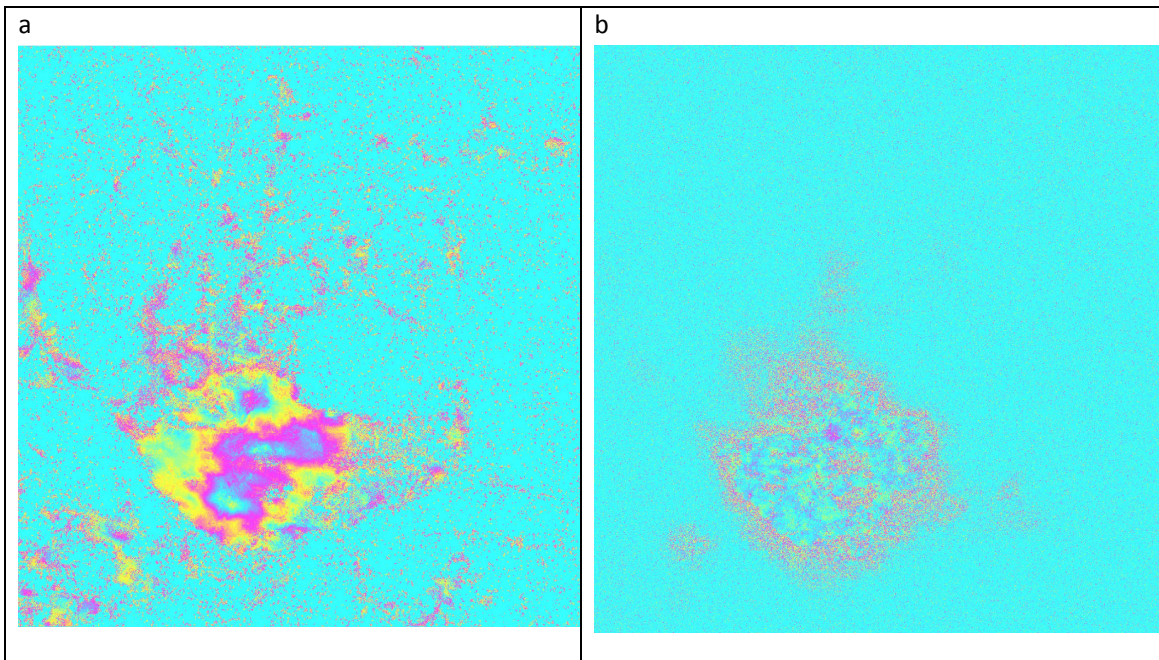


Figure 23- L'interférogramme 20090317-20090405 avant et après la soustraction atmosphérique.

4.3.4 Inversion du réseau

Inévitablement, et en particulier à cause de la dynamique saisonnière existante à Manaus, la plupart des couples d'images ne vont pas être utiles pour la génération des interférogrammes. C'est soit parce que la ligne de base est trop grande, ou plus probablement en raison de décorrélation temporelle quand la couverture a trop changé entre les dates d'acquisition.

Dans ce contexte, les interférogrammes les plus utiles sont sélectionnés à partir des caractéristiques suivantes : (a) une cohérence acceptable, (b) une courte ligne de base perpendiculaire et (c) une présence significative du signal de déplacement en considérant la séparation de dates la plus longue possible (grande *baseline* temporelle).

Pour le cas de Manaus, la limite de la cohérence utilisée est de 0.20, la ligne de base maximum choisie est de 300m, et la base temporelle est supérieure à 200 jours. En plus de ces critères ci-dessus, il est essentiel que les interférogrammes sélectionnés forment un réseau connecté de scènes SAR.

La Figure 24-a permet de visualiser les 244 couples possibles (formés en utilisant les images énumérés). 84 interférogrammes ont été sélectionnés visuellement et numériquement en examinant la cohérence. Les 19 couples optimaux ont été retenus pour former le réseau illustré Figure 24b. Les lignes qui connectent les images SAR énumérés représentent les couples retenus suffisamment cohérents.

Les scènes qui ne sont pas connectées au réseau principal ne pouvaient pas être temporellement référencées à la principale structure de réseau.

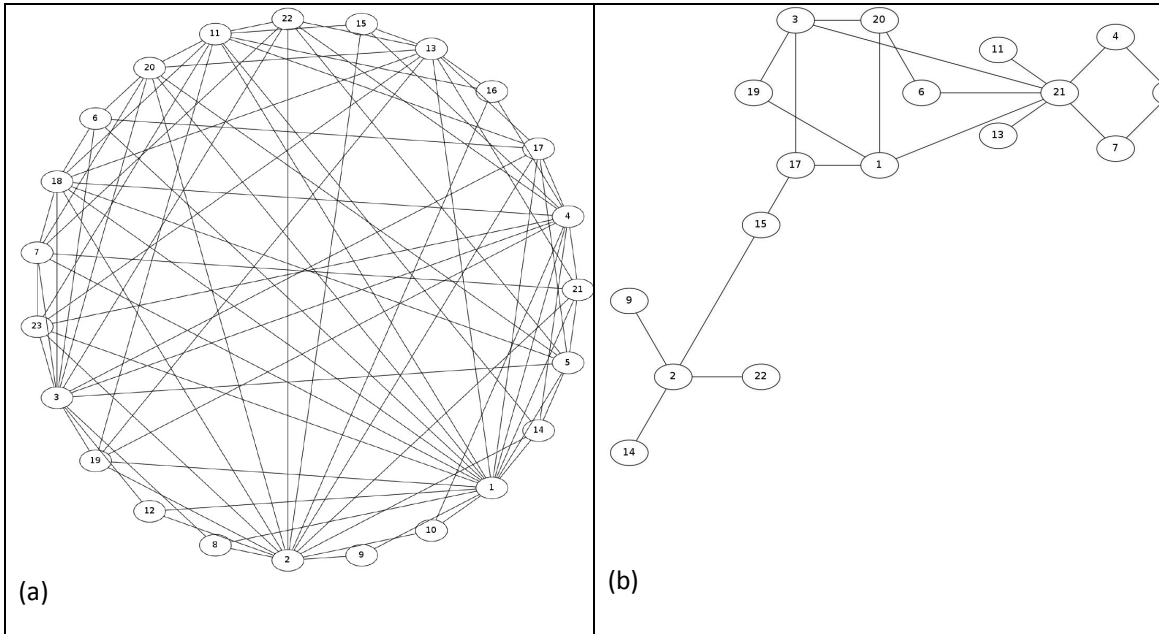


Figure 24 – La réseau cohérent des interférogrammes, (a) 244 couples ; (b) 19 couples.

L'exemple de la Figure 24(b) montre le réseau extrait de la pile de 24 images radarsat-2. Il manque les scènes 5, 8, 10, 12, 16 et 18 qui ne sont pas présentes car elles ne forment pas des couples cohérents. Ces scènes correspondent respectivement aux dates d'acquisitions : 20090128, 20090410, 20090528, 20090715, 20091019, 20091206. Dans ce cas, on observe qu'il n'y a pas une corrélation directe entre le saison et la cohérence car les images représentent différents mois au cours de l'année (janvier, avril, mai, juillet, septembre et décembre).

4.3.5 Détection de mouvement

Cette étape du traitement consiste à identifier les zones potentielles de déplacement afin qu'elles puissent être ensuite masquées et protégées au cours des différentes étapes de l'analyse à haute résolution. L'image SLC a été coupée aux limites de la zone urbaine de Manaus qui représente la région réelle d'intérêt, ce qui permet de diminuer la durée du traitement. Les méthodes pour identifier ces zones comprennent l'empilage (*stacking*) des interférogrammes et la vérification d'existence du signal de déplacement dans les interférogrammes indépendants, qui ne présentent pas de scène en commun (Figure 25).

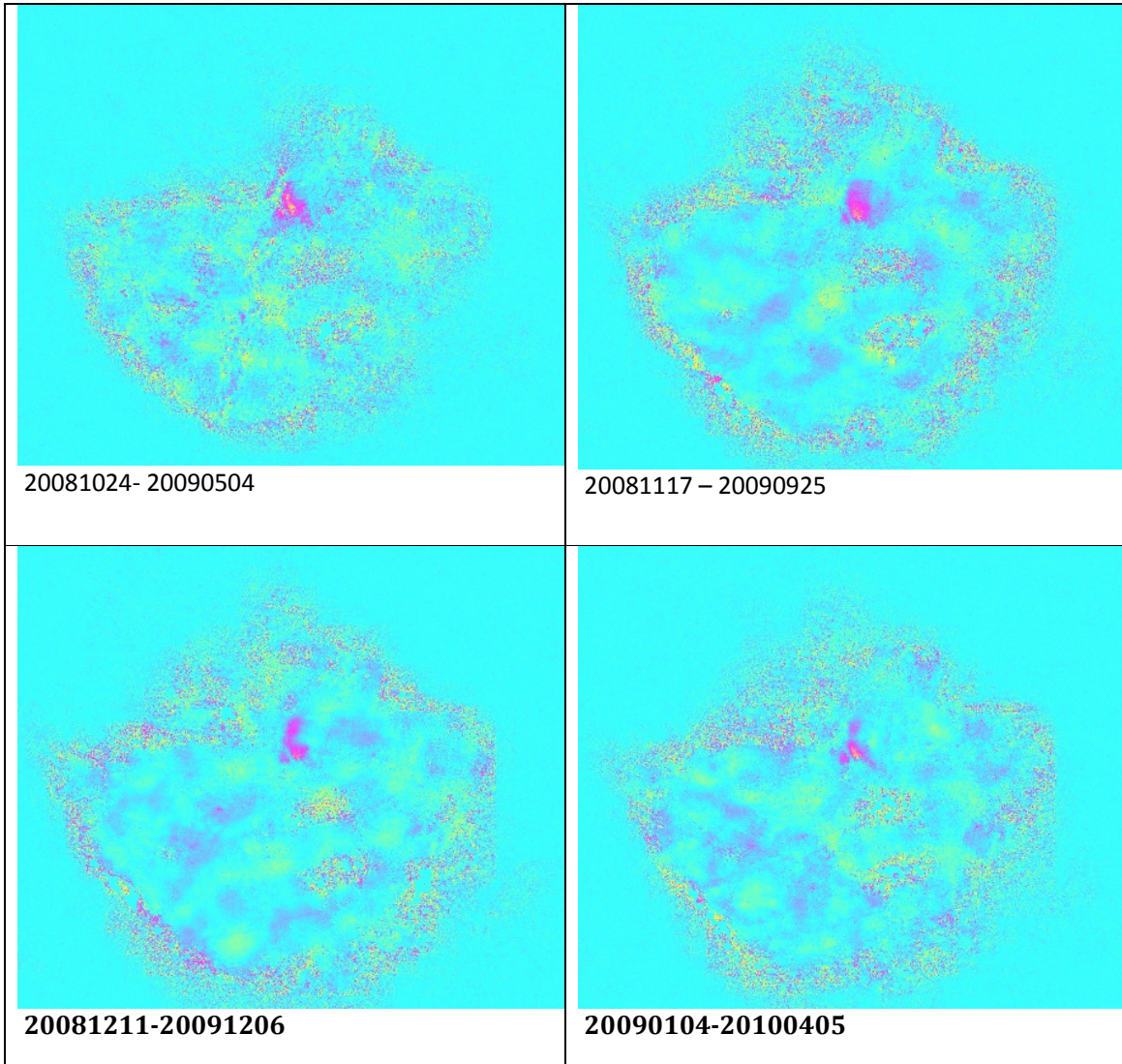


Figure 25 – Quatre interférogrammes indépendants qui présentent le signal de déplacement sur la ville de Manaus.

Idéalement, les interférogrammes qui présentent le meilleur compromis (*trade-off*) entre haute cohérence, petite *baseline* perpendiculaire, et le plus long intervalle de temps, sont utilisés pour la reconnaissance du signal de déplacement. Les zones de déplacement sont identifiées et masquées manuellement sous la forme de polygones en respectant la forme du motif présent sur l'interférogramme de ligne de base temporelle la plus grande. Le masque couvrant le déplacement sera utilisé dans l'analyse de Point Target présentée dans le section suivante.

4.3.6 L'analyse Point Target InSAR

La première étape de l'analyse de *Point Target* est l'identification de cibles ponctuelles selon la méthode de stabilité de phase discutée dans la section 4.1.1. La Figure 26 montre les PTs sélectionnés sur la ville de Manaus en bleu.



Figure 26 – PTs sélectionnés dans la ville de Manaus.

Par la suite, un réseau SBAS est formé par la génération d'un MST (*Minimum Spanning Tree*) (Wikipedia) qui minimise les lignes de base perpendiculaires absolues tout en préservant la connectivité complète du réseau. En vue d'insuffler une redondance dans le réseau, le MST est répété trois fois, chaque MST précédent est retiré avant un nouveau calcul. Pour une pile SAR avec N scènes, $3N - 3$ interférogrammes ponctuels sont conservés. La Figure 27 illustre le réseau SBAS formé à partir de la pile des images Fine du satellite Radarsat-2 comprenant 24 scènes. Les *baselines* temporelles ne sont pas utilisées car la phase a été déjà déterminée comme stable sur l'exécution de la pile lors de la sélection de PTs. L'utilisation exclusive des lignes de base perpendiculaires comme fonction

de *score* minimise également les franges d'erreur de hauteur, qui sont difficiles pour le déroulement de phase 3D.

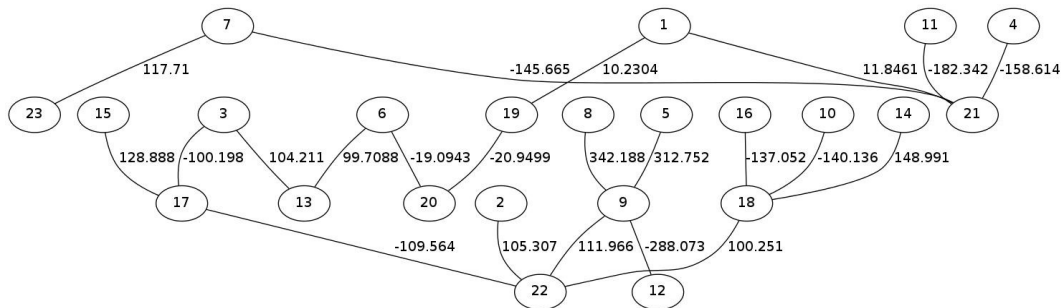


Figure 27 – Le MST pour la pile de Manaus. Les noeuds représentent les images et les arcs représentent les couples comme valeur les *baselines* perpendiculaires.

Les principales étapes de l'analyse *Point Target Network* sont illustrées à Figure 28, et décrit ci-dessous.

A) Les interférogrammes ponctuels sont générés pour le réseau SBAS. Les variations de phase à long échelle due à l'atmosphère, et les franges de courte échelle associée à l'erreur d'hauteur sont évidentes.

B) Les APS générés pendant l'étape antérieure de reconnaissance du mouvement sont échantillonnées sur les PTs pour chaque interférogramme et enlevés. Les variations de phase de courte échelle restent.

C) Le réseau SBAS d'interférogrammes ponctuels est spatio-temporellement déroulé (3D *unwrapping*).

D) Chaque interférogramme est spatialement référencé à un voisinage stable, puis inversé par SVD pour dériver une phase ponctuelle pour chaque acquisition. La densité de franges locales change car la date de référence correspond à la moyenne temporelle de la pile. L'information de phase après le déroulement 3D et l'inversion SVD représente la meilleure estimation de phase pour une scène donnée, mais contient encore les perturbations dues à l'atmosphère statique, l'erreur de hauteur, et une atmosphère de courte échelle.

E) Les corrections de phase, y compris l'enlèvement de l'erreur de hauteur et la correction de l'atmosphère statique, sont appliquées. L'erreur de hauteur est estimée en effectuant une régression linéaire sur l'historique de phase temporelle par rapport à la hauteur et est convertie en phase en utilisant l'altitude d'ambiguïté. L'atmosphère statique est estimée en effectuant une régression linéaire des variations de phase spatiale par rapport à la hauteur. Cette régression modélise les changements d'épaisseur de la colonne atmosphérique par rapport au relief (pas très marqué à Manaus).

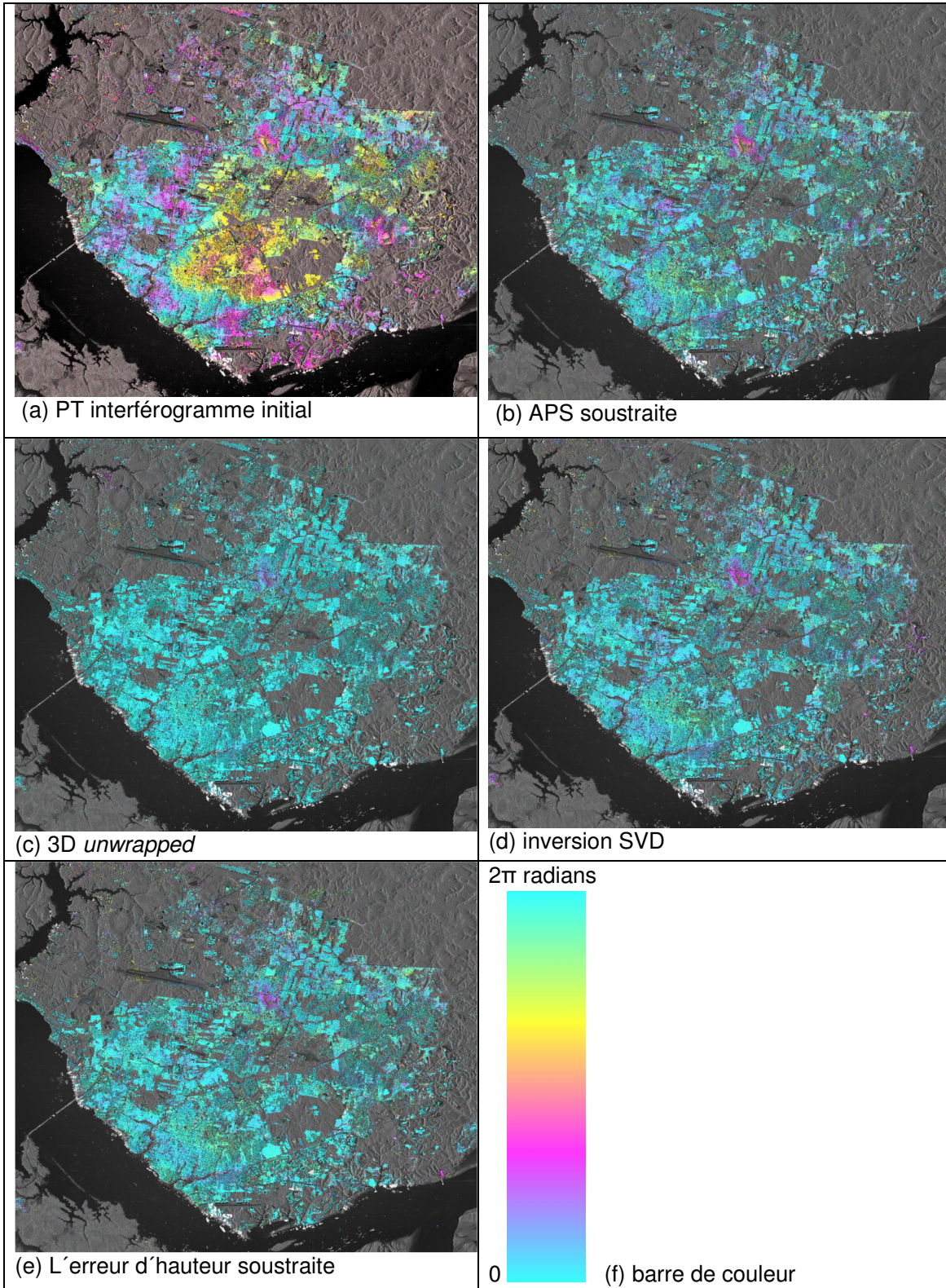


Figure 28 – L'analyse *Point Target* appliquée sur les interférogrammes Radarsat-2 de Manaus.

Suite à l'analyse ponctuelle, chaque couche de phase est convertie en déplacement (LOS) et géocodée. Une table de couleur est appliquée à l'image géocodée avant de la publier dans *Google Earth* en utilisant un fichier *Keyhole Markup Language* (KML).

La Figure 29 montre les résultats de l'analyse PTInSAR en utilisant une table de couleur correspondant à -3cm/+3cm superposée à l'image optique disponible dans *Google Earth*. L'illustration représente le déplacement cumulé obtenu entre octobre 2008 et janvier 2011.

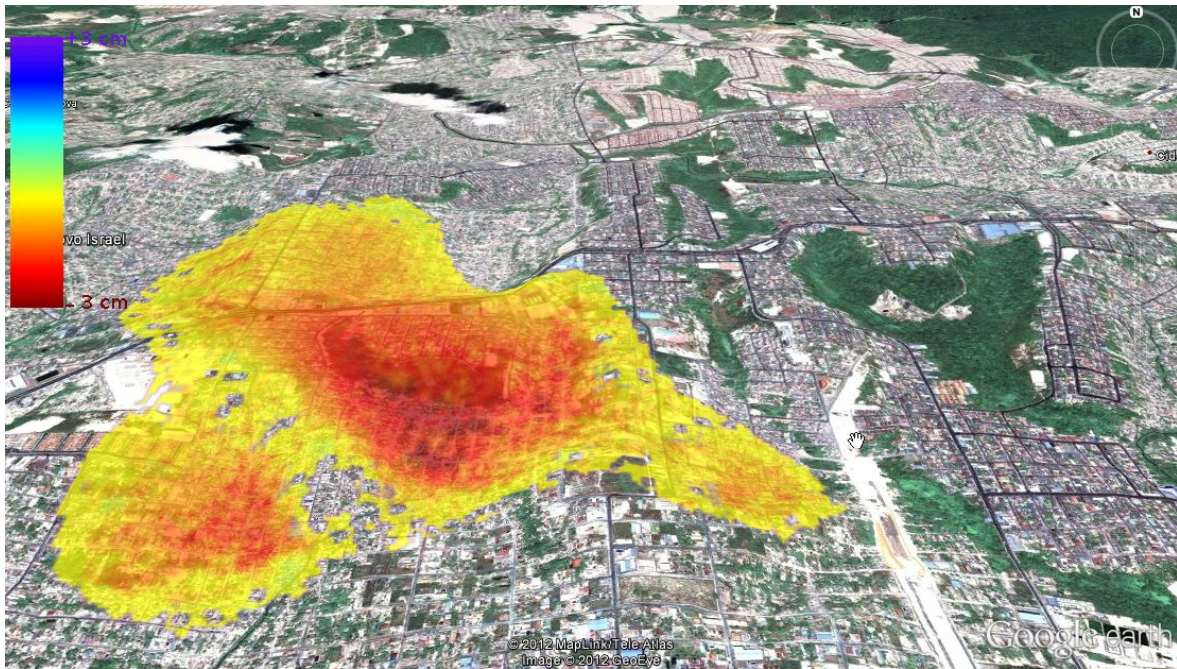


Figure 29 – Déplacement cumulative obtenu entre octobre 2008 et janvier 2011.

Ces résultats ont confirmé les résultats préliminaires obtenus dans le traitement des images Radarsat-1 ou le motif de déplacement est localisé à côté d'une anomalie circulaire de drainage (Figure 30), ce qu'indique une origine géologique pour l'existence du mouvement de sol.

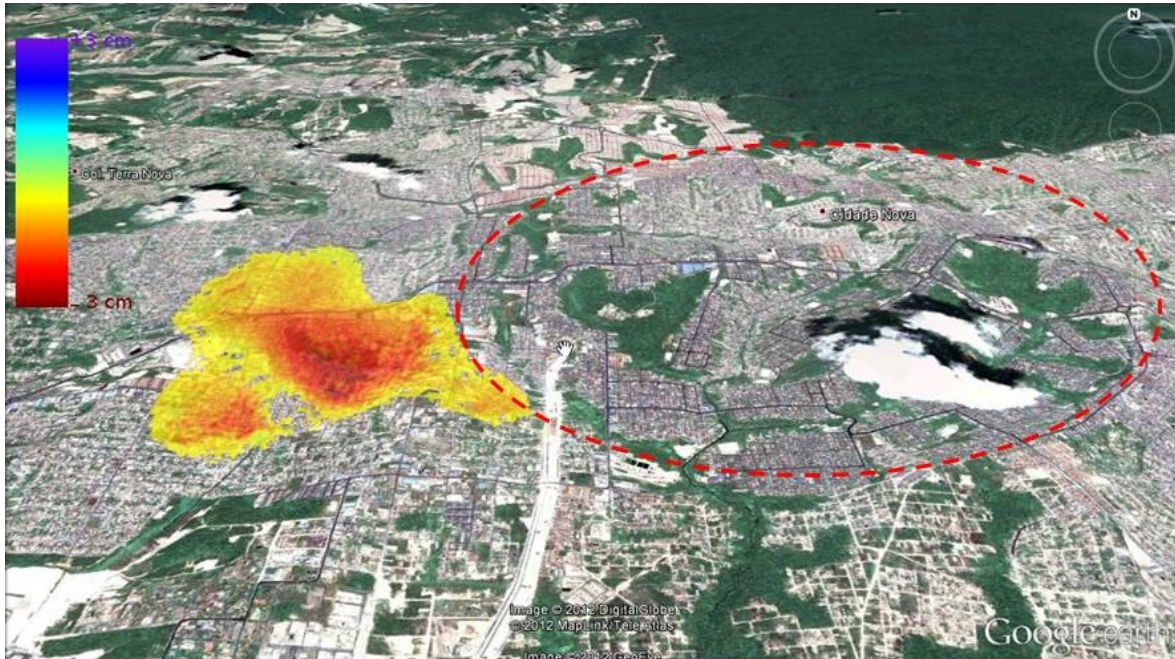


Figure 30 – Localisation de la zone de déplacement à côté de l’anomalie circulaire de drainage (en rouge).

4.3.7 Discussion finale et perspectives

Les résultats ont montré aussi que la période qui présente les valeurs les plus significatives de déplacement correspond aux mois de septembre, octobre et novembre des années 2008 et 2009. Les valeurs obtenues pour les mois d’août et décembre sont aussi significatives. Cette période coïncide avec la saison de reflux et sécheresse du fleuve l’Amazonas, ce qui indique une corrélation temporel et saisonnière et apporte une nouvelle connaissance aux études néotectoniques sur la région amazonienne.



Figure 31 – Déplacement graduel temporel obtenu par le traitement InSAR de données Radarsat-2.

5 Conclusion générale et perspectives

Dans la première partie, nous avons exposé la problématique de l'extraction des mesures de déplacement appliquée à l'Amazonie en utilisant la télédétection, les principes et les caractéristiques des méthodes employées, la motivation et l'objectif principal.

Dans les deuxième et troisième parties, nous avons présenté les principaux résultats obtenus au cours de cette thèse selon les deux principales méthodes du traitement de données interférométriques : l'approche DInSAR classique et l'approche PTInSAR.

Nous concluons ces travaux dans ce chapitre en résumant les principaux résultats obtenus et en évaluant nos contributions face aux problèmes spécifiques. Enfin, nous discutons des perspectives suite à ces travaux.

5.1 Principaux résultats

Cette section synthétise les principaux résultats obtenus au cours de cette thèse. Ils sont présentés en fonction des traitements effectués sur les séries d'images.

L'analyse de la série d'images RADARSAT-1 a permis :

1. L'identification d'une zone de déplacement localisée dans la ville de Manaus, subissant un mouvement lent et graduel entre août 2006 et décembre 2007, vérifié qualitativement sur les données Radarsat-1.
2. L'analyse spatiale et la mise en évidence des motifs sur la zone urbaine de Manaus à côté d'une anomalie circulaire de drainage à partir de l'approche classique de l'interférométrie différentielle.
3. L'obtention de 18 mesures du déplacement de cette zone (Tableau 3).

L'analyse de la série d'images RADARSAT-2 a permis :

1. L'application de l'approche basée sur la méthode *Dual-Scale PSI* publiée par Rabus et Ghuman (2009) dans la pile de 24 images du satellite Radarsat-2 obtenue entre les années 2008 et 2010, afin de vérifier et mesurer l'existence d'une zone de mouvement de la croûte sur la ville de Manaus trouvée dans l'étude antérieure en utilisant la technique DInSAR sur les données Radarsat-1.

2. L'application de la chaîne de traitement appelée *Dual-Scale Network Analysis* basée sur la méthode *Dual-Scale PSI* développée par l'entreprise canadienne 3vGeomatics, pour :
 - générer les 244 couples possibles,
 - en sélectionner 84 visuellement et numériquement en examinant la cohérence,
 - inverser les 19 couples optimaux
 - obtenir un profil temporel du déplacement entre les années de 2008 et 2009.
3. La comparaison entre l'étude Radarsat-1 et l'estimative quantitative de déplacement (affaissement) du terrain obtenu en utilisant les données Radarsat-2 qui ont convergé spatialement et temporellement.

Toutefois, nous n'avons pas pu effectuer une véritable validation des mesures, en raison de l'absence de moyens comme un réseau GPS, par exemple. La seule façon de faire une évaluation de résultats est de comparer les motifs découverts avec les connaissances existantes du domaine d'application, qui doivent être assez bonnes pour distinguer les motifs pertinents des non pertinents.

5.2 Contributions

Dans cette section, nous montrons les contributions essentielles de nos travaux selon deux axes : le traitement de l'information et la géologie. En ce qui concerne le traitement de l'information, il s'agit principalement de combiner et comparer les différentes méthodes de l'interférométrie SAR orbitale. En ce qui concerne l'aspect géologique, il s'agit de l'apport des nouvelles méthodes ou nouveaux résultats qui permettent d'élargir et approfondir la connaissance actuelle du phénomène étudié.

5.2.1 Traitement de l'information

L'application de l'interférométrie différentielle orbitale à la mesure du déplacement du terrain sur la région de l'Amazonie brésilienne a été réussie pour la première fois grâce à la prise en compte de l'information géologique existante, à l'adoption d'une stratégie de multi-échelles en déroulement de phase et la combinaison et comparaison entre les résultats obtenus par les différentes approches méthodologiques DInSAR et PTInSAR.

Dans ces travaux, on s'intéresse en approfondir les connaissances sur chaque étape du traitement appliqué pour la première fois à notre connaissance sur cette zone tropicale au

Brésil. Les stratégies bien connues sur d'autres régions du globe ont été reproduites sur Manaus avec succès, ce qui représente une avancée surtout sur le côté applicatif des méthodologies InSAR. La stratégie PTInSAR proposée a bien conduit à l'extraction de l'information relative au phénomène des effets atmosphériques fortement présents en région amazonienne.

En ce qui concerne le domaine de la télédétection, l'utilisation de deux générations successives de capteur SAR, Radarsat-1 et Radarsat-2, a permis de compléter et renforcer la véracité des mesures, en s'appuyant sur deux sources de données et deux approches différentes issues de l'état de l'art associé à ces données. Ce renforcement mutuel de résultats obtenus avec des données de missions successives illustre toute l'importance de la continuité des observations avec le même type de données (bande C ici), même si la compatibilité interférométrique est perdue. A ce titre, nos résultats se rapprochent d'études exploitant des réseaux d'interférogrammes ERS + ENVISAT, avec des réseaux séparés pour chaque satellite, mais complémentaires dans le temps au niveau de l'observation de la déformation.

5.2.2 Géologie

D'un point de vue de la géologie, le premier apport important de ces travaux se trouve sur l'application réussie de l'interférométrie différentielle à la mesure de champ de déplacement du terrain urbain localisé sur le bassin sédimentaire du Solimões, un de plus étudiés et importants du Brésil.

Les mesures issues de l'interférométrie différentielle fournissent une nouvelle information précise par rapport à la géologie et la géomorphologie, ce qui permet de mieux contraindre la modélisation géologique et hydrologique de cette région et de tester la présence de mouvements néotectoniques actifs en Amazonie. Ceci n'avait pas pu être réalisé avec les mesures issues de la corrélation d'images SAR et optiques et les mesures sur le terrain utilisées dans les autres travaux. Les travaux avec les mesures obtenues dans cette thèse complètent donc les études effectuées précédemment.

5.3 Perspectives

Ces travaux ouvrent des pistes d'amélioration à court terme et des pistes dirigées vers des recherches plus approfondies. L'influence des effets atmosphériques pour les mesures D-

INSAR dans le contexte de l'Amazonie n'a pas encore été beaucoup étudiée. D'un côté il est nécessaire d'agrandir l'acquisition de données atmosphériques pour les intégrer à la connaissance de la télédétection SAR. De l'autre côté, l'utilisation de différentes longueurs d'ondes disponibles sur les plateformes satellitaires doit fournir une meilleure compréhension sur les limites et potentiels de la technologie pour ce type d'application. Des travaux réalisés avec cette stratégie et les comparaisons avec les autres stratégies peuvent fournir des résultats intéressants qui permettront une application encore plus pertinente et précise pour des problèmes tels que celui présenté dans cette thèse.

Les principales pistes suggérées à court terme sont :

- 1) Le traitement des images ALOS archivées (18 acquisitions) et 30 nouvelles acquisitions prévues pour le programme ALOS-2 pour le projet de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro (investigateur principal Fernando Pellon et co-investigateur Fernanda Ledo G. Ramos) afin d'approfondir les connaissances sur cette région ;
- 2) La comparaison entre les résultats déjà existants (Radarsat-1 et Radarsat-2) et les futurs résultats avec le capteur ALOS-2 afin de trouver les avantages de chaque type de données.

A un niveau plus méthodologique, il nous semble important de travailler sur des méthodes d'inversion de réseaux très localisés pour mettre en œuvre facilement une inversion sur des petites séries temporelles et de petits motifs tels que la bulle de Manaus dans la série Radarsat-1. Enfin, à plus long terme, compte tenu de l'aspect « fragmenté » de ces réseaux issus des différentes séries temporelles disponibles, il sera également intéressant de chercher des solutions d'inversion jointe en exploitant soit une période de recouvrement temporel, soit une modélisation permettant de raccorder les périodes de mesure. Ce type de travaux, intégrant modélisation et observations partielles, nous rapprochera des méthodes d'assimilation de données actuellement mises en œuvre avec succès dans les domaines de l'atmosphère et des océans.

Liste de Figures

Figure 1 Géométrie du système SAR (Skolnik 1990). Les ellipses successives représentent la zone imagée par chaque pulse dans la fauchée (<i>swath</i>). La scène est limitée par la distance en zone proche (near range) et la zone loin (far range) et, en azimut, pour l'heure de début et de fin d'acquisition.....	15
Figure 2 – Représentation d'un pixel SLC dans les coordonnées x et y en utilisant le diagramme d'Argand :partie réelle (q) et imaginaire (i), phase (φ) et amplitude (α).....	17
Figure 3– Géométrie InSAR relative au terrain et à l'ellipsoïde. La phase interférométrique est liée à la longueur de la trajectoire en plus ($\delta\rho$) entre S2 et P. Le triangle en pointillé représente la géométrie InSAR par rapport au sol et le triangle gras par rapport à l'ellipsoïde. Les termes représentés par 0 se réfèrent à la géométrie ellipsoïdale (Hanssen 2001).	19
Figure 4 – Résumé de la méthodologie DInSAR appliquée sur les données Radarsat-1.....	23
Figure 5 - Interférogramme sur la ville de Nottingham (Angleterre) en couvrant une région de 1500km ² (Leighton 2010).	25
Figure 6 - (a) Image de cohérence sur la région de Manaus, interférogramme Radarsat-1, 23 octobre 2006 / 5 décembre 2007. <i>Baseline</i> perpendiculaire de 40m; (b) Image du satellite Landsat sur la même région.....	28
Figure 7 - Interférogrammes avec 1 et 10 looks. Le graphic present le rapport entre l'écart-type de phase e le nombre de "looks" (N).....	29
Figure 8 – L'image de différence de distance: (a) Vallée du Chamonix en France ; (b) Manaus, Amazonas.	31
Figure 9 - Soustraction des franges orbitales et topographiques.....	32
Figure 10 - Illustration des axes de fréquence locales sur les franges simulés d'un interférogramme. La lettre P désigne la période.....	33
Figure 11 - Le graphique supérieure montre la phase interférométrique modulo 2 pi enroulé entre deux points et la graphique inférieure représente la reconstruction de phase après le déroulement.	35
Figure 12 - (a) Distribution des franges sur l'interférogramme Radarsat-1 (16/11/2006 – 05/12/2007, <i>baseline</i> perpendiculaire de 5,7m) qui peut être totalement visualisé sur (b). La figure (c) présente le motif interférométrique appelé AMC par Ramos (2009).....	36
Figure 13 - Interférogramme (16/11/2006 – 05/12/2007) résultant de la soustraction des franges orbitales et topographiques. L'AMC en détail dedans le polygone rouge.....	37
Figure 14 - Interférogrammes Radarsat-1 sur la ville de Manaus, en détail l'AMC. Les couples sont identifiés par les nombres correspondant sur le Tableau 2.	38

Figure 15 – Localisation des ROIs 1 et 2 sur l’interférogramme final. La zone en rouge représente l’AMC et la région en vert la zone stable de référence.....	40
Figure 16 – Valeurs de déformation pour l’interférogrammes Radarsat-1 de Manaus.....	42
Figure 17 – Exemple de diagramme de Réseau InSAR sur la pile Radarsat 2 de Manaus.	48
Figure 18 – La chaîne de traitement <i>Dual-scale PTI Network Analysis</i>	50
Figure 19 – Carte de déplacement accumulé sur la ville de Manaus.	54
Figure 20 – Amplitude moyenne de toutes les images SLC recalées dans la géométrie RDC...	56
Figure 21 – Passage du MNT en géométrie radar et de l’amplitude moyenne en géométrie terrain.	57
Figure 22 – (a) et (b) représentent les couple 20081024 – 20111017 avant et après la correction de ligne de base, de même pour (c) et (d) avec le couple 20100429-20100523.....	58
Figure 23- L’interférogramme 20090317-20090405 avant et après la soustraction atmosphérique.	59
Figure 24 – La réseau cohérent des interférogrammes, (a) 244 couples ; (b) 19 couples.....	61
Figure 25 – Quatre interférogrammes indépendants qui présentent le signal de déplacement sur la ville de Manaus.....	62
Figure 26 – PTs sélectionnés dans la ville de Manaus.....	63
Figure 27 – Le MST pour la pile de Manaus. Les noeuds représentent les images et les arcs représentent les couples comme valeur les <i>baselines</i> perpendiculaires.	64
Figure 28 – L’analyse <i>Point Target</i> appliquée sur les interférogrammes Radarsat-2 de Manaus.	65
Figure 29 – Déplacement cumulative obtenu entre octobre 2008 et janvier 2011.	66
Figure 30 – Localisation de la zone de déplacement à côté de l’anomalie circulaire de drainage (en rouge).	67
Figure 31 – Déplacement graduel temporel obtenu par le traitement InSAR de données Radarsat-2.....	67

Liste de Tableaux

Tableau 1 – Dates des images Radarsat-1, valeurs de <i>baseline</i> perpendiculaire et temporelle pour les 57 couples sélectionnés.....	27
Tableau 2 – Les colonnes représentent l’index, les dates des images qui forment les couples, les valeurs de <i>baseline</i> temporelle et perpendiculaire.	39
Tableau 3 - Dates des images des couples interférométriques, valeur maximale de ROI1 et moyenne de ROI2, écart type, phase interférométrique final en radians et cm. Présence ou non du motif AMC.	41

Bibliographie

Bamler, R. and P. Hartl (1998). "Synthetic aperture radar interferometry." Inverse problems **14**(4): R1.

Bawden, G. W., W. Thatcher, et al. (2001). "Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects." Nature **412**(6849): 812-815.

Berardino, P., G. Fornaro, et al. (2000). "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **40**: 2375-2383.

Berardino, P., G. Fornaro, et al. (2002). "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential interferograms." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **40**(11): 2375-2383.

Bevis, M., D. Alsdorf, et al. (2005). Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon river system and Earth's elastic response. Geophysical Research Letters. **32**: 4.

Brisco, B., N. Short, et al. (2009). SAR Interferometry and Polarimetry for Mapping and Monitoring Permafrost in Canada. 4th International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry (POLinSAR), Frascati, Italy.

Ferretti, A., C. Prati, et al. (2000). "Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **38**(5): 2202-2212.

Ferretti, A., C. Prati, et al. (2001). "Permanent Scatterers in SAR interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **39**(1): 8 - 20.

Fornaro, G., A. Pauciuolo, et al. (2009). "Deformation monitoring over large areas with multipass differential SAR interferometry: a new approach based on the use of spatial differences." International Journal of Remote Sensing **30**(6): 1455-1478.

Gabriel, A. K., R. M. Goldstein, et al. (1989). "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry." Journal of Geophysical Research **94**(B7): 9183-9191.

Gehlot, S. and R. F. Hanssen (2008). Monitoring and Interpretation of Urban Land Subsidence Using Radar Interferometric Time Series and Multi-Source GIS Database. Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters: 137 - 148.

Ghiglia, D. C. and L. A. Romero (1994). "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods." Journal of Optical Society of America **11**(1): 107 - 117.

Goldstein, R. M. and C.L.Werner (1998). "Radar interferogram filtering for geophysical applications." Geophysical Research Letters **25**(21): 4035-4038.

Goldstein, R. M., H. A. Zebker, et al. (1988). Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. Radio Science. **23**: 8.

Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Pub.

Hooper, A. (2008). "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches." Geophysical Research Letters **35**(L16302).

Hooper, A., H. Zebker, et al. (2004). "A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers." Geophysical Research Letters **31**: L23611, doi:10.1029/2004GL021737.

Hooper, A. and H. A. Zebker (2007). "Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series." JOSA A **24**(9): 2737-2747.

Huntley, J. M. (2001). "Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm." Applied Optics **40**(23): 3901-3908.

Lee, J.-S., A. R. Miller, et al. (1994). "Statistics of phase difference and product magnitude of multi-look processed Gaussian signals." Waves in Random Media **4**(3): 307-319.

Leighton, J. M. (2010). GPS and PSI Integration for Monitoring Urban Land Motion. Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham. . **Thesis of degree of Doctor of Philosophy**.

Li, F., D. N. Held, et al. (1985). "Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic-aperture radars." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **24**: 47-55.

Liao , M. S., J. L. M., et al. (2005). Urban change detection using coherence and intensity characteristics of multi-temporal ERS-1/2 imagery. ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes". Enschede, the Netherland: 8 - 11.

Lu, Z., C. Wicks, et al. (2003). "Surface deformation associated with the March 1996 earthquake swarm at Akutan Island, Alaska, revealed by C-band ERS and L-band JERS radar interferometry." Journal of Geophysical Research **108**(2354).

Massonnet, D. and K. L. Feigl (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface." Reviews of Geophysics **36**(4): 441-500.

Massonnet, D., M. Rossi, et al. (1993). "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry." Nature **364**(8): 138-142.

Rabus, B., M. Eineder, et al. (2003). "The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar." ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing **57**: 241 - 262.

Rabus, B. T. and P. S. Ghuman (2009). "A simple robust two-scale phase component inversion scheme for persistent scatter interferometry (dual-scale PSI)." Canadian Journal of Remote Sensing **35**(4): 12.

Rabus, B. T. and P. S. Ghuman (2009). "A simple robust two-scale phase component inversion scheme for persistent scatterer interferometry (dual-scale PSI)." Canadian Journal of Remote Sensing **35**(4): 399-410.

Ramos, F. L. G., F. P. Miranda, et al. (2012). Fusion d'informations issues de la télédétection radar pour l'observation de déplacements dans la région de Manaus (Amazonie). Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection. **198-199**: 30 - 38.

Raucoules, D., S. Le Mouelic, et al. (2003). "Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry." International Journal of Remote Sensing **24**(4): 91 - 97.

Remy, D., S. Bonvalot, et al. (2007). Inflation of the Aira Caldera (Japan) detected over Kokubu urban area using SAR interferometry ERS data. European Geosciences Union, eEarth. **2**: 17-25.

Santoro, M., A. Fanelli, et al. (1999). Monitoring Urban Areas by Means of Coherence Levels. Second international workshop on ERS SAR interferometry, Frascati, European Space Agency.

Scheiber, R. and A. Moreira (2000). "Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **38**(5): 2179 -2191.

Schneider, R. Z., K. P. Papathanassiou, et al. (2006). "Polarimetric and interferometric characterization of coherent scatterers in urban areas." Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on **44**(4): 971-984.

Skolnik, M. I. (1990). An introduction to impulse radar. DTIC Document, NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC.

Trouvé, E., M. Caramma, et al. (1996). "Fringe detection in noisy complex interferograms." Applied Optics **35**(20): 3799 - 3806.

Trouvé, E., J. M. Nicolas, et al. (1998). "Improving Phase Unwrapping Techniques by the Use of Local Frequency Estimates." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **36**(6): 1963 - 1972.

Vasile, M. G. (2007). Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture interférométrique et polarimétrique. Application au suivi des glaciers alpins. Annecy-le-Vieux, Université de Savoie and Université Polytechnique de Bucarest. **PhD**: 924.

Werner, C., U. Wegmuller, et al. (2003). "Interferometric Point Target analysis for deformation mapping." International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 21-25 July 2003: 3 pages, cdrom.

Wikipedia. "Minimum Spanning Tree." Retrieved May 24, from http://en.wikipedia.org/wiki/Minimum_spanning_tree.

Woodhouse, I. H. (2006). Introduction to Microwave Remote Sensing. Boca raton, FL, Taylor & Francis.

Worawattanamateekul, J., J. Hoffmann, et al. (2003). Radar interferometry technique for urban subsidence monitoring a case study in Bangkok and its vicinity. Proc. of the 2004 Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria.

Wright, T., B. E. Parsons, et al. (2001). Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry. Geophysical Research Letters. **28**: 2117 - 2120.

Yan, Y. (2011). Fusion de mesures de déplacements issues d'imagerie SAR: Application aux modélisations séismo-volcaniques. LISTIC. Annecy, France, Université de Grenoble. **Doctorat**: 207.

Yan, Y., M.-P. Doin, et al. (2012). "Mexico City Subsidence Measured by InSAR Time Series: Joint Analysis Using PS and SBAS Approaches." IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing **5**(4).

Zebker, H. A. and Y. Lu (1998). "Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut least-squares, and synthesis algorithms." Journal of the Optical Society of America A. **15**(3): 586-598.

Zebker, H. A., C. L. Werner, et al. (1994). "Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Data." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **32**(4): 823-836.

Manuscrit de thèse de doctorat en Portugais
Tese de Doutorado em Português



DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS PARA PROCESSAMENTO DE DADOS
ORBITAIS DE INTERFEROMETRIA SAR EM REGIÕES EQUATORIAIS ÚMIDAS:
ESTUDO DE CASO EM MANAUS, AMAZONAS, BRASIL.

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador(es): Nome(s)

Alexandre Gonçalves Evsukof
Fernando Pellon de Miranda
Emmanuel Trouvé

Rio de Janeiro
Setembro de 2013

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS PARA PROCESSAMENTO DE DADOS
ORBITAIS DE INTERFEROMETRIA SAR EM REGIÕES EQUATORIAIS ÚMIDAS:
ESTUDO DE CASO EM MANAUS, AMAZONAS, BRASIL.

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO
E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Nelson Favilla Ebecken, DSc.

Dr. Laurent Polidori, Dr.

Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho, DSc.

Dr. Emmanuel Trouvé, Dr.

Prof. Alexandre Gonçalves Evsukoff, Dr.

Dr. Fernando Pellon de Miranda, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2013

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS PARA PROCESSAMENTO DE DADOS
ORBITAIS DE INTERFEROMETRIA SAR EM REGIÕES EQUATORIAIS ÚMIDAS:
ESTUDO DE CASO EM MANAUS, AMAZONAS, BRASIL.

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos

Setembro/2013

Orientadores: Alexandre G. Evsukoff

Fernando Pellon de Miranda

Emmanuel Trouvé.

Programa: Engenharia Civil

Durante a última década, os sucessivos lançamentos de satélites para observação da Terra com sensores SAR (Synthetic Aperture Radar) a bordo têm mostrado o seu potencial, uma vez que estes sistemas são capazes de cobrir grandes áreas com alta resolução, o que representa uma vantagem para o monitoramento da superfície terrestre. A massa de dados gerados permitiu o desenvolvimento da interferometria de radar e sua aplicação para o estudo de pequenas deformações em áreas urbanas ou em zonas de falhas, mostrando que a técnica pode ser aplicada em diferentes escalas espaciais de deformação, assim como escalas temporais que variam de algumas semanas a mais de uma década. Geralmente, estes tipos de aplicações têm sido limitadas às regiões não equatoriais do mundo, devido à presença de perturbações atmosféricas que afetam o sinal de radar. Dado o grande tamanho e a localização remota de bacias tropicais, como a Amazônia, observações de satélite permanecem como uma abordagem viável para validar modelos geofísicos existentes. Neste contexto, esta tese propõe estender aplicações convencionais, tendo o cuidado de investigar o potencial e as limitações da interferometria SAR para a medição de deformação do solo na região da Amazônia, ainda não estudadas neste contexto específico.

O objetivo da investigação é a de explorar diferentes técnicas e estimar o deslocamento do terreno na área urbana de Manaus, a maior cidade no estado do Amazonas no Brasil, que é um local importante para a exploração e transporte de petróleo e gás. Tal região está rodeada por ecossistemas frágeis, que a tornam muito sensível à presença da indústria do petróleo. Desta forma, a compreensão da dinâmica temporal e distribuição espacial de fenômenos neotectônicos é fundamental para o desenvolvimento das melhores práticas de gestão ambiental.

No nível metodológico, para superar os principais desafios da aplicação de interferometria diferencial sobre a série temporal do satélite Radarsat-1, uma estratégia multi-escala e “model-free” com base na informação de deformação não-linear ao longo do tempo foi aplicada com sucesso. A característica essencial deste processamento é a separação do sinal de fase em contribuições de pequena e grande dimensão espacial para simplificar a separação dos três componentes principais da fase (topografia, atmosfera e movimento da superfície ou deformação do terreno). Isto leva a um processamento mais robusto e permite que o componente de inversão de fase para pequenas séries de imagens seja realizado com sucesso.

No nível geofísico, a aplicação de interferometria para investigar o movimento do solo é realizada pela primeira vez na Amazônia, complementando os estudos anteriores de geologia estrutural realizados com base nas medições de correlação de imagens ópticas e de medições de campo.

O presente estudo fornece informações precisas sobre a hipótese de movimento crustal recente associado às atividades neotectônicas da bacia amazônica. Os resultados indicam a amplitude do movimento do terreno no centro da cidade de Manaus em uma área adjacente a uma anomalia circular de drenagem. As imagens dos satélites Radarsat-1 e Radarsat-2 obtidas entre 2006 e 2010 sobre esta região proporcionam uma melhor compreensão da atividade geológica e movimento da crosta terrestre na bacia amazônica.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

SAR INTERFEROMETRY ANALYSIS BASED ON ORBITAL DATA OVER EQUATORIAL REGIONS: A CASE
STUDY IN MANAUS, AMAZONAS, BRAZIL

Fernanda Ledo Gonçalves Ramos

September/2013

Advisors: Alexandre G. Evsukoff

Fernando Pellon de Miranda

Emmanuel Trouvé.

Department: Civil Engineering

During the past decade, successive satellites launches for Earth observation with SAR (Synthetic Aperture Radar) sensors onboard have shown its potential, since these systems are able to cover large areas with high resolution, which represents an advantage for surface monitoring. The mass of data generated has enabled the development of radar interferometry and its application to the study of small deformations in urban areas or in fault zones, showing that the technique was able to focus on different spatial scales of deformation, as well as temporal scales ranging from a few weeks to more than a decade. Usually, these types of applications have been limited to non-equatorial regions of the world due to the presence of atmospheric disturbances that affect the radar signal. Given the large size and the remote location of tropical basins such as the Amazon, satellite observations remain as a viable approach to validate existing geophysical models. In this context, this thesis proposes to extend conventional applications, taking care to investigate the potential and limitations of SAR interferometry for the measurement of ground deformation in the Amazon region, not yet studied in this specific context. The research aim is to estimate the displacement at the surface of the Earth on the urban area of Manaus, the largest city in the state of Amazonas in Brazil, which is an important site for oil and gas exploration and the transport. This site is surrounded by fragile ecosystems, which make it very sensitive to the presence of the oil industry.

Considering this, an understanding of the temporal dynamics and spatial distribution of neotectonic phenomena is fundamental to the development of best practice environmental management.

At the methodological level, to overcome the major challenges of the application of differential interferometry on a Radarsat-1 time series, a multi-scale and "model free" strategy, based on the information of a non-linear deformation over time is passed successfully. The essential feature of this process is the separation of the phase signal into

small and large scale spatial contributions to simplify the separation of the three phase components (topography, atmosphere and movement). This leads to a more robust processing and allows the phase component inversion for small piles of images. At the geophysical level, the application of interferometry to investigate the ground movement is performed for the first time in the middle of the Amazon, complementing previous studies of structural geology based on measurements from the correlation of optical images and field measurements. In addition to prior knowledge, this study provides accurate information on the hypothesis of recent crustal movements associated with neotectonic activities of the Amazon basin. The results indicate a range of motion of the adjacent crust structure circular drainage in the city of Manaus. The Radarsat-1 and Radarsat-2 images acquired between 2006 and 2010 over this region provide a better understanding of geological activity and crustal movement in the Amazon basin.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	14
1.1 Justificativa e Objetivos	15
1.2 Posicionamento do trabalho.....	16
1.2.3 Organização do documento.....	17
2. O Sistema SAR	18
2.1 Geometria SAR	18
2.1.1 Resolução em <i>Range</i> ou Alcance	19
2.1.2 Resolução em azimute	20
2.1.3 Características das imagens SAR.....	20
2.2 InSAR	21
2.2.1 A fase interferométrica	22
2.2.2 Contribuições da fase.....	23
2.2.3 Geometria InSAR.....	24
2.2.4 Modelo InSAR.....	25
2.2.5 Interferometria diferencial (DInSAR) e a abordagem PSInSAR.....	26
2.3 Processamento InSAR	27
2.3.1 Co-registro de dados	27
2.3.2 Reamostragem e Interpolação.....	28
2.3.3 Geração de Interferograma	28
2.3.4 Estimativa de coerência	29
2.3.5 Filtragem	30
2.3.6 <i>Multilooking</i>	30
2.3.7 Desdobramento de fase.....	32
2.3.8 Stacking	34
3. Processamento InSAR RADARSAT-1 sobre Manaus (AM).....	36
3.1 Dados utilizados	36

3.2 Metodologia.....	36
3.3 Análise de pares interferométricos: coerência, fase (análise de <i>aliasing</i>) e <i>baseline</i> perpendicular.....	38
3.4 Transformação entre as geometrias radar e solo.....	43
3.5 Simulação e subtração de franjas orbitais e topográficas.....	44
3.6 Filtragem e Redução de escala.....	45
3.7 Geração de frequência local das franjas interferométricas.....	46
3.8 Detecção da principal feição interferométrica.....	48
3.9 Desdobramento de fase e análise estatística (medida da deformação).....	53
3.10 Discussão Final e Perspectivas.....	56
4 Análise PTI (<i>Point Target</i> InSAR) aplicada sobre os dados Radarsat-2 : Abordagem <i>Dual-Scale Network</i> e resultados.....	57
4.1 Identificação de alvos pontuais estáveis (<i>Point Targets</i>) em imagens SAR.....	57
4.2 Conceitos e etapas da análise em <i>Dual-Scale Network</i>	60
4.2.1 Rede InSAR (<i>Network</i> InSAR).....	60
4.2.2 Análise <i>Dual-Scale Network</i>	61
4.2.3 Processamento 2D <i>Stack</i>	63
4.2.4 Reconhecimento de zonas de deformação.....	64
4.2.5 Análise <i>Point Target Network</i>	64
4.2.6 Desdobramento de fase em 3D.....	65
4.3 Resultados.....	66
4.3.1 Dados originais, registro et geocodificação.....	67
4.3.2 Correção de <i>baseline</i> geométrica.....	70
4.3.3 Subtração da fase atmosférica de longa escala.....	71
4.3.4 Inversão da rede.....	72
4.3.5 Detecção de deformação.....	74
4.3.6 Análise <i>Point Target</i> InSAR.....	76
4.3.7 Discussão final e perspectivas.....	81

5 Conclusões Gerais e perspectivas	82
5.1 Principais resultados	82
5.2 Contribuições	83
5.2.1 Processamento de dados InSAR orbital	84
5.2.2 Geologia	84
5.3 Perspectivas	85
6 Referências Bibliográficas	87

Lista de Figuras

- Figura 1** – Geometria do sistema SAR. Pulsos emitidos em alta frequência enquanto a plataforma se desloca conforme o vetor de velocidade ou direção em azimute (Skolnik, 1990). As sucessivas elipses representam a área alcançada por cada pulso dentro do swath. A cena é limitada pelo near e far range e em azimute pelo tempo inicial e final da aquisição. A visada lateral do satélite reduz a ambigüidade de distância entre os avos. 19
- Figura 2** – Representação de um pixel SLC em coordenadas x e y utilizando-se o diagrama de Argand. A parte real, em valor de fase (q) e imaginária, valor de quadratura (i) são armazenadas de forma complexa e relacionadas à fase (φ) e amplitude (α) a partir da conversão de coordenadas cartesianas para polares..... 21
- Figura 3** – Geometria InSAR relativa ao terreno e ao elipsóide. A fase interferométrica está relacionada ao comprimento do percurso extra ($\delta\rho$) entre S_2 and P. O triângulo tracejado representa a geometria InSAR em relação à superfície terrestre e o triângulo em negrito em relação ao elipsóide. Os termos representados por 0 se referem à geometria elipsoidal (Hanssen, 2001). 22
- Figura 4** – Interferograma sobre a cidade de Nottingham (Inglaterra) cobrindo uma área de aproximadamente 1500km². franjas (Leighton, 2010). 29
- Figura 5** – (a) Imagem de coerência sobre a área de Manaus, interferograma Radarsat-1, datas de aquisição: 23 de outubro de 2006 e 5 de dezembro de 2007. Baseline perpendicular = 40m; (b) Imagem do satélite Landsat sobre aproximadamente a mesma área. 30
- Figura 6** – Interferogramas processados com 1 e 10 looks. O gráfico apresenta a relação entre o desvio padrão da fase e o número de “looks” (N)..... 31
- Figura 7** - O gráfico superior apresenta a fase interferométrica modulo 2π *wrapped* entre dois pontos e o gráfico inferior representa a reconstrução da fase após a etapa de desdobramento (*unwrapping*). 33
- Figura 8** – Metodologia de processamento interferométrico do dados Radarsat-1. 37
- Figura 9** - Imagem de coerência (esquerda) e amplitude (direita) para o par formado entre as imagens de 16 de novembro de 2006 e 5 de dezembro de 2007. Baseline temporal de 384 dias e baseline perpendicular de 5m..... 39
- Figura 10** – Imagem de diferença de distâncias : (a) vale de Chamonix, Alpes Franceses ; (b) área de Manaus, Amazonas. 43
- Figura 11** – (a) Interferograma Inicial; (b) simulação de franjas orbitais e topográficas; (c) Interferograma final. 45
- Figura 12**– Filtragem e redução de escala sobre interferograma Radarsat-1 de Manaus.... 46
- Figura 13**– (a) Interferograma Radarsat-1 de Manaus com franjas poluídas pelo ruído; (b) interferograma da área do vulcão Etna na Itália, onde efeitos de *layover* e áreas sem coerência interrompem o padrão de franjas (Trouvé, 1996). 47

- Figura 14**– Resultados do programa MUSIC sobre os dados de Radarsat-1 de Manaus; (a) Imagens de orientação e largura das franjas ; (b) Imagem de amplitude e de confiança; (c) Máscara *threshold*. 48
- Figura 15**– (a) detalhe do padrão de franjas do interferograma Radarsat-1 (16/nov/2006 – 05/dez/2007) que pode ser visualizado em sua totalidade em (b). A figura (c) apresenta a feição interferométrica denominada de AMC. 49
- Figura 16**– Interferograma (16/nov/2006 – 05/dez/2007) resultante da subtração de franjas orbitais e topográficas. AMC em detalhe no polígono em vermelho 50
- Figura 17**– Interferogramas Radarsat-1 sobre Manaus, com detalhe para AMC. Os pares estão identificados pelos números correspondentes na Tabela 3..... 51
- Figura 18**– A esquerda interferogramas antes e depois do desdobramento de fase. A direita o histograma da feição AMC nos eixos x e y..... 53
- Figura 19**– Localização das ROIs 1 e 2 sobre o interferograma final. A área em vermelho representa a AMC e a área em verde a zona estável de referência. 54
- Figura 20** – Valores de deformação para os interferogramas Radarsat-1 de Manaus. 56
- Figura 21** - Exemplo de diagrama de rede InSAR para a série de imagens Radarsat- 2 de Manaus. 61
- Figura 22** – Fluxograma do processamento *Dual-scale PSI Network*. 63
- Figura 23** - Imagem da deformação cumulativa sobre a área urbana de Manaus..... 67
- Figura 24**– Amplitude média obtida a partir de todas as imagens SLC registradas em geometria RDC. 68
- Figura 25** –Transformação do MDE em geometria radar e amplitude média em geometria de terreno..... 70
- Figura 26** - (a) e (b) representam os pares 20081024 – 20111017 antes e depois da correção de *baseline*, o mesmo para (c) e (d) que representam o par 20100429-20100523. 71
- Figura 27** - Interferograma 20090317-20090405 antes e depois da subtração da fase atmosférica..... 72
- Figura 28**– Rede coerente de interferogramas, (a) 244 pares ; (b) 19 pares ótimos. 73
- Figura 29**– Exemplo de quatro interferogramas independentes que apresentam o sinal de deformação sobre a área urbana de Manaus..... 75
- Figura 30**– PTs selecionados sobre a área urbana de Manaus..... 76

Figura 31 –MST da série de imagens de Manaus. Os números dentro dos círculos representam as imagens SAR e os arcos representam os pares e seus valores de <i>baseline</i> perpendicular.	77
Figura 32 – Sequência do processamento Point Target aplicado aos interferogramas Radarsat-2 de Manaus.	79
Figura 33 – Deformação cumulativa obtida entre outubro de 2008 e janeiro 2011.	80
Figura 34 – Localização da área de deformação crustal adjacente à anomalia circular de drenagem (em vermelho).	81
Figura 35 – Gráfico da deformação gradual obtida pelo processamento InSAR das imagens Radarsat-2.	81

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características principais dos dados SRTM e Radarsat-1 utilizados.	36
Tabela 2 – Datas das imagens e valores de <i>baseline</i> perpendicular e temporal para os 57 pares selecionados.	42
Tabela 3 – Número de identificação, datas das imagens que formam o par interferométrico e valores de <i>baseline</i> temporal e perpendicular.	52
Tabela 4 – Data das imagens do par interferométrico, valor máximo de ROI1 e média de ROI2, DP (desvio padrão), fase interferométrica final em radianos e cm. Presença ou não da feição AMC.	55

1. Introdução

O lançamento do satélite europeu ERS-1 (*European Remote-Sensing Satellite*) em 1991 marcou o início do desenvolvimento de técnicas e aplicações da tecnologia de interferometria por radar (InSAR). As pesquisas realizadas durante a década de 90 podem ser agrupadas em três principais categorias: geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), mapeamento de deformações da superfície terrestre, caracterização de superfície do relevo e mudanças de uso do solo. Inicialmente, a tecnologia foi aplicada com sucesso no mapeamento de deformações da superfície terrestre durante erupções vulcânicas e sismos. Estes estudos forneceram relevantes informações sobre a dinâmica do magma e um melhor entendimento sobre a distribuição e ruptura de depósitos de sedimentos associados aos eventos sísmicos (Lu *et al.*, 2003).

No final dos anos 90, estudos de movimentos de subsidência e soerguimento de superfície, associados à extração e injeção de fluidos em aquíferos subterrâneos e na exploração petrolífera, demonstraram que a utilização de dados gerados por interferometria fornecem importantes subsídios para a mitigação de riscos relativos a estas atividades. Além disso, a tecnologia InSAR se mostrou como um meio efetivo para detectar lentos movimentos de massa, se tornando referência para o monitoramento de escorregamento de encostas.

A construção de Modelos Digitais de Elevação (MDE) empregando a interferometria SAR se desenvolveu em áreas onde levantamentos fotogramétricos não eram adequados, em virtude das condições climáticas locais. Hoje, pode-se citar a missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA, que gerou o MDE de cerca de 80% da superfície terrestre, como o melhor exemplo desta aplicação (Rabus *et al.*, 2003).

A tecnologia InSAR é atualmente empregada, na maioria dos casos, em estudos de caracterização e detecção de mudanças de uso e ocupação do solo, como no caso da prevenção aos desastres naturais (vulcões, terremotos, enchentes, derretimento de geleiras e alteração de *permafrost*, por exemplo). Nos últimos anos, o mapeamento de deformações da superfície terrestre avançou, permitindo o desenvolvimento de novas metodologias de monitoramento de risco geotécnico para faixas de dutos de óleo e gás que cruzam grandes extensões territoriais ambientalmente complexas. No Brasil, as empresas Petrobras e Transpetro realizaram com sucesso dois projetos em trechos de dutos. Um deles, intitulado *Integrated Pipeline Geohazard Monitoring Service* (Serviço Integrado de Monitoramento de Risco Geotécnico para Dutos), foi realizado em 2007, em conjunto com a Agência

Espacial Canadense. Vale ressaltar que a tecnologia InSAR foi utilizada, ainda, para fins de detecção de movimento crustal na Amazônia brasileira. Tal trabalho forneceu a motivação para a realização da presente pesquisa, cujos dados foram gentilmente cedidos pela Petrobras e pela empresa canadense MDA (*McDonald Detwiller and Associates*).

Para os próximos anos, a expectativa é de que ocorra uma série de inovações técnicas e científicas em muitos aspectos da tecnologia InSAR, tendo em vista a grande quantidade de satélites com sensores SAR recentemente lançados, como o RADARSAT-2, ALOS, Cosmo Skymed, TerraSAR-X, dentre outros. Além da maior cobertura temporal e garantia de continuidade das missões orbitais anteriores, as características técnicas avançadas destes sensores ampliam suas aplicações através da utilização de diferentes comprimentos de onda (bandas C, L e X, respectivamente) e polarização em quadratura. Esta última, combinada à análise por interferometria, é chamada de interferometria polarimétrica (PolInSar), que possibilita o aperfeiçoamento da caracterização de estruturas vegetais e feições da superfície terrestre, aumentando o potencial de uso das aplicações já citadas anteriormente.

1.1 Justificativa e Objetivos

A utilização de sensoriamento remoto por radar nos limites da bacia Amazônica começou no final de 1980. Estes estudos combinam diferentes dados espaciais e informação geofísica, incluindo geração de mapas, detecção de mudanças na cobertura florestal e monitoramento de inundação de seus principais rios a partir de informações de amplitude do sinal de radar. Mais recentemente, a utilização das informações de coerência e fase do sinal SAR demonstraram ser mais eficazes por exemplo para a diferenciação de árvores e estimativa de volume. No entanto, o potencial e as limitações da interferometria orbital SAR para medir a deformação de terreno na região da Amazônia ainda não foram estudadas.

Manaus é uma cidade em crescimento que possui 1,8 milhões de habitantes, localizada na confluência dos rios Negro e Amazonas. O estudo InSAR pode proporcionar uma melhor compreensão da dinâmica espacial e temporal da distribuição da deformação solo na região, permitindo possíveis conexões com eventos neotectônicos.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é caracterizar o movimento crustal recente em Manaus, complementando o estudo de Bevis, Alsdorf et al. (2005), que mostrou um ciclo anual de

deslocamento vertical nesta área com uma amplitude de 50 a 75 milímetros medidos a partir de uma estação GPS. Este é considerado uma grande oscilação da crosta e indica que a litosfera é susceptível de entrar em colapso e rebote em resposta a alterações no peso da coluna de água.

Com o objetivo de explorar diferentes estratégias metodológicas e contribuir para o conhecimento sobre a interferometria orbital SAR na região da Amazônia, foram realizados dois estudos, o primeiro a partir dos dados Radarsat-1 (já publicados em Ramos, Miranda *et al.* 2012), e em seguida, uma segunda investigação utilizando o método de *Dual-Scale PSI* (Rabus e Ghuman 2009) sobre um conjunto de dados Radarsat-2. Finalmente, uma análise da integração dos resultados foi realizada para determinar o movimento do solo com menos ruído e maior confiabilidade estatística. Estes resultados confirmam a subsidência do terreno dentro da área urbana de Manaus, no centro da região amazônica.

1.2 Posicionamento do trabalho

Esta tese foi elaborada no âmbito do projeto de cooperação Brasil - França CAPES COFECUB e realizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro e na Universidade de

Savoie em Annecy, França.

A pesquisa foi desenvolvida a partir de duas principais áreas de conhecimento: o Sensoriamento Remoto e a Geologia. O trabalho envolve o processamento de um grande volume de dados SAR obtidos por sensoriamento remoto para caracterizar o movimento crustal verificado na cidade de Manaus, Amazonas.

Para a comunidade de sensoriamento remoto, este trabalho tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de técnicas de interferometria diferencial em áreas úmidas equatoriais. É importante mencionar que, dentre a comunidade brasileira de sensoriamento remoto, a interferometria espacial não é muito difundida, como pode ser observado na maior conferência organizada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), onde nos últimos anos (2011 e 2013) menos de cinco artigos foram publicados sobre este assunto em um total de 1200 trabalhos.

1.2.3 Organização do documento

Esta tese está organizada em três partes principais. A primeira parte refere-se à revisão da literatura sobre o estado da arte no domínio do sensoriamento remoto, especificamente com base nos sensores de radar. São apresentadas a história, os princípios gerais e noções básicas de sistemas SAR e processamento InSAR.

Os capítulos 3 e 4 mostram, respectivamente, a aplicação das duas principais abordagens

metodológicas: DInSAR (Interferometria Diferencial SAR) e PTInSAR (*Point Target Interferometry*) em dados de satélites Radarsat-1 e Radarsat-2 obtidos entre 2006 e 2010, para extrair a medida de deformação de terreno na cidade de Manaus.

No capítulo final, apresentamos as conclusões e perspectivas do trabalho.

2. O Sistema SAR

A seguir, os principais aspectos do sistema SAR serão discutidos.

O sistema SAR (*Synthetic Aperture Radar*) é um sistema coerente ativo de imageamento por microondas (Skolnik, 1990). Um radar coerente tem a capacidade de medir a fase, obtida através de um controle preciso sobre:

(a) tempo de início e ângulo de fase do pulso transmitido; (b) frequência do oscilador coerente (demodulador), (c) movimento da plataforma, incluindo a compensação do movimento. A principal vantagem de um sistema coerente é que ele preserva a informação de fase do sinal recebido para posterior processamento. Esta constitui a principal diferença para os sistemas óticos que utilizam a não coerência e não preservam a fase.

A observação do valor de fase do sistema SAR promove novas oportunidades para a exploração de dados, de uma forma que não é disponível nos sensores óticos.

2.1 Geometria SAR

A Figura 1 mostra a geometria básica de um sistema SAR. O satélite se desloca na direção de azimute e seu vetor de velocidade, ou caminho percorrido é conhecido. Após a interação com a superfície imageada, os ecos retornam ao sensor e são convertidos em *range* ou “alcance” em português. Dois ecos de um mesmo pulso que retornam ao satélite ao mesmo tempo possuem um alcance equivalente e serão sobrepostos. A configuração de visada lateral elimina essa ambigüidade, uma vez que os ecos do *far range* (far significa o alcance mais distante) precisarão de mais tempo para retornar do que aqueles mais próximos do satélite. (Woodhouse, 2006).

A antena ilumina uma área na superfície terrestre conhecida como *swath*. A largura do *swath* depende da elevação da antena e é proporcional ao comprimento de onda e ao tamanho da antena. A porção do *swath* mais próxima da visada em nadir do satélite (90 graus em relação à superfície terrestre) é conhecida como *near range* e a mais distante, *far range*. O ângulo entre o pulso de microondas transmitido e o ângulo nadir do satélite representa o ângulo de incidência (θ) que aumenta quando a antena se desloca entre *near* e *far range*.

A distância entre o sistema SAR e um determinado alvo constitui o *slant range* (ρ) que é claramente uma função do ângulo de incidência em relação à topografia da superfície terrestre. A antena é geralmente perpendicular ao vetor de velocidade, o que compõe a chamada direção de visada.

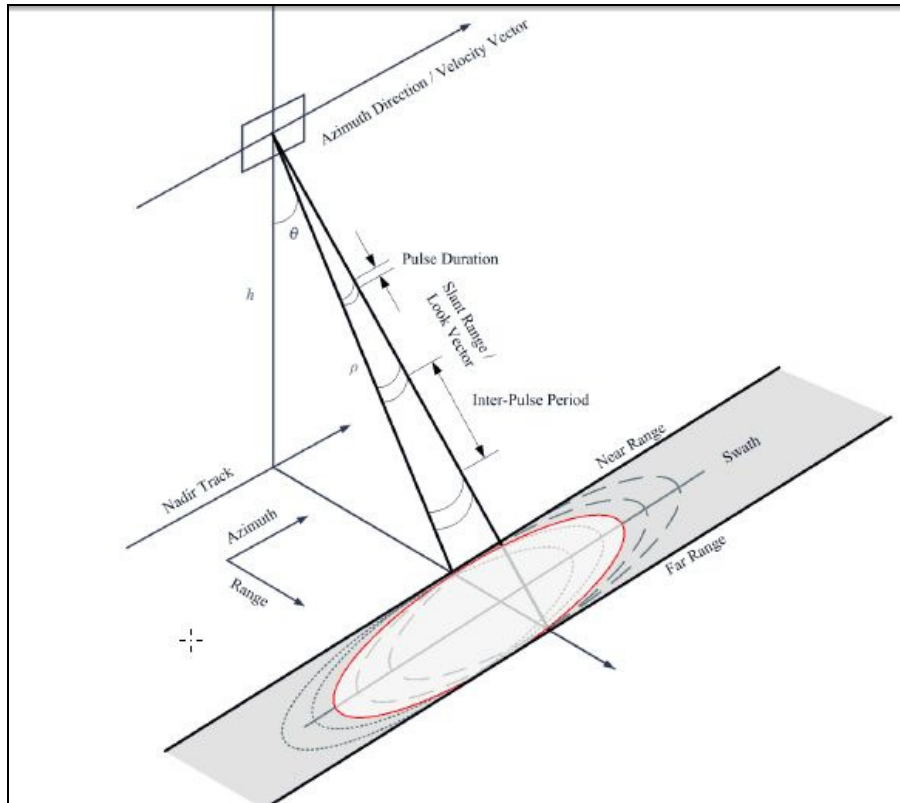


Figura 1 – Geometria do sistema SAR. Pulsos emitidos em alta frequência enquanto a plataforma se desloca conforme o vetor de velocidade ou direção em azimute (Skolnik, 1990). As sucessivas elipses representam a área alcançada por cada pulso dentro do swath. A cena é limitada pelo near e far range e em azimute pelo tempo inicial e final da aquisição. A visada lateral do satélite reduz a ambigüidade de distância entre os avos.

A imagem original contém valores complexos e é bidimensional, ou seja, deve ser considerada em: (a) *range* ou alcance, representa a distância perpendicular à linha de vôo; (b) azimute, distância ao longo da trajetória do vôo.

2.1.1 Resolução em *Range* ou Alcance

A resolução espacial (em qualquer direção) representa a distância mínima necessária entre dois pontos para que estes sejam discernidos como objetos separados na imagem. Para a resolução em alcance dois alvos devem estar separados por uma distância (em *slant range*) maior que a metade do comprimento físico do pulso. (Curlander e McDonough, 1991).

A resolução em alcance é diretamente relacionada ao tamanho do pulso transmitido pelo sensor, e quanto menor o pulso, mais fina será a resolução. O tamanho do pulso pode ser entendido como o produto entre a velocidade da luz e a duração da transmissão do sinal em microssegundos. Como o sinal do radar viaja até o alvo e retorna ao sensor, o tamanho do pulso é dividido por 2 para que se determine a resolução em *slant range* conhecido como geometria radar que difere da geometria do terreno. A resolução em *slant range* é constante em toda a imagem (entre *near* e *far range*). As imagens do tipo Fine do satélite Radarsat-2 possuem 5.2 metros de resolução nominal em *slant range*.

2.1.2 Resolução em azimute

A resolução em azimute depende das características da antena do sistema SAR e de sua abertura sintética e é independente da distância em alcance e da altitude do sensor. Quando o objeto é visto pela primeira vez pela antena ao longo de sua trajetória em azimute, múltiplos ecos refletidos pelo alvo são gravados pelo sistema até que o mesmo esteja fora do alcance da antena. A abertura sintética transforma os múltiplos retornos de um único alvo em uma única resposta, o que efetivamente reduz a resolução em azimute de quilômetros para alguns metros (Hanssen, 2001). O processo de síntese desses retornos é denominado de compressão em azimute e é análogo ao filtro casado (*matched filter*, também conhecido como compressão em *range*) que é usado para melhorar a resolução em *range*. A resolução nominal em azimute do modo *Fine* do satélite Radarsat-2 é de 7.7m.

2.1.3 Características das imagens SAR

As imagens SAR utilizadas em interferometria são focadas em *slant range* e cada pixel complexo (formato SLC ou *Single Look Complex*) possui coordenadas x e y e é representado por suas partes real (q) e imaginária (i). A Figura 2 apresenta a relação entre os componentes reais e imaginários com os valores de amplitude e fase. A derivação dos valores de fase e amplitude é equivalente à conversão entre coordenadas cartesianas e polares

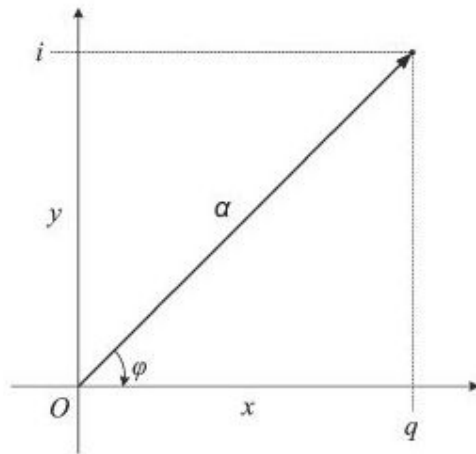


Figura 2 – Representação de um pixel SLC em coordenadas x e y utilizando o diagrama de Argand. A parte real, em valor de fase (q), e imaginária, e o valor de quadratura (i), são armazenados de forma complexa e relacionadas à fase (φ) e amplitude (α), a partir da conversão de coordenadas cartesianas para polares.

A resolução de um pixel na imagem SLC (aproximadamente 20 m em *range* para o ENVISAT, por exemplo), comparada ao comprimento de onda (5,6cm), é grande e a área representada por cada pixel pode conter centenas de alvos individuais. Cada um dos alvos possui seu próprio coeficiente de reflexão e estes elementos podem causar atraso ou rotação na fase e ainda deslocá-la. O valor de fase de cada pixel é a soma de uma quantidade desconhecida de números complexos que somados representam um valor randômico (Massonnet and Feigl, 1998).

Se o alvos elementares de um pixel permanecerem estáveis durante a aquisição de duas imagens e seus correspondentes valores de fase forem diferenciados, o elemento randômico é cancelado, eliminado. Desta forma, é possível isolar as contribuições de fase ou a mudança de comportamento da fase, o que representa a base fundamental da interferometria.

2.2 InSAR

O termo interferência é consequência do princípio de sobreposição de ondas realizado por Thomas Young em 1801 (Born *et al.*, 1959). Sobreposição de ondas de energia eletromagnética interagem de uma forma que a amplitude resultante é a soma das amplitudes de cada onda (Towne, 1988). Como a frequência do sistema SAR é fixa, a diferença de fase entre as ondas permanecem constantes e são preservadas. Esta é a principal característica de um sistema denominado coerente.

Como discutido anteriormente, não é possível distinguir dois pontos distanciados em *slant range* ao menos que a distância mínima entre eles seja maior que a metade do comprimento físico do pulso. Na Figura 3, P e P₀ representam os pontos separados em *slant range*. A Figura sugere que a trigonometria pode ser utilizada para observar a diferença angular entre P₀ no elipsóide e P na superfície terrestre quando duas aquisições de um sistema SAR foram originadas de diferentes posições.

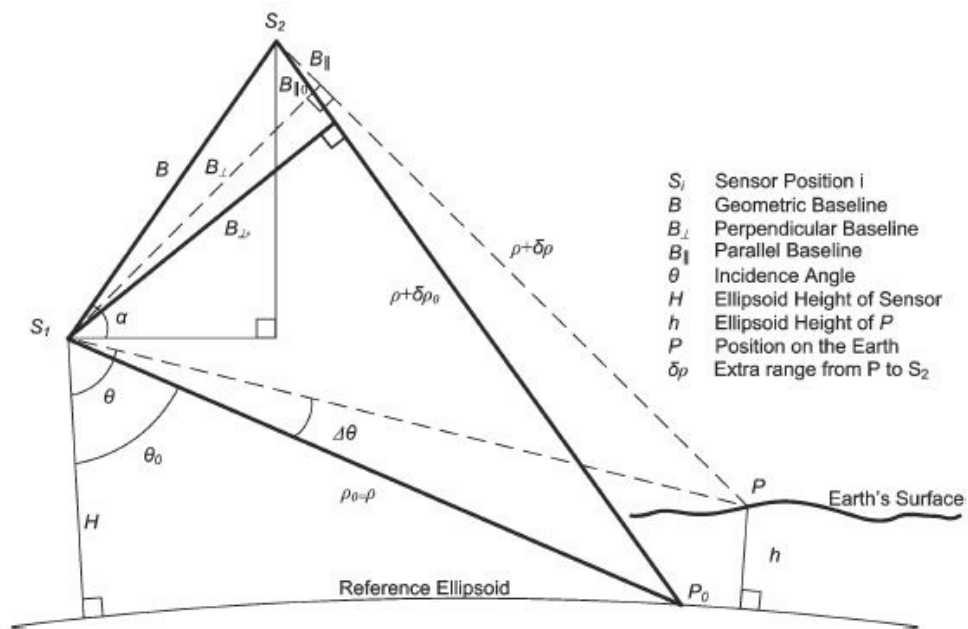


Figura 3 – Geometria InSAR relativa ao terreno e ao elipsóide. A fase interferométrica está relacionada ao comprimento do percurso extra ($\delta\rho$) entre S_2 and P . O triângulo tracejado representa a geometria InSAR em relação à superfície terrestre e o triângulo em negrito em relação ao elipsóide. Os termos representados por 0 se referem à geometria elipsoidal (Hanssen, 2001).

2.2.1 A fase interferométrica

A fase interferométrica definida como a diferença de fase entre duas aquisições resulta em franjas de interferência de acordo com os mesmos princípios do experimento de Young. Franjas em um

interferograma ocorrem porque suas origens são coerentes apesar de originadas em diferentes posições. Quanto mais distantes os satélites no momento das aquisições, maior a quantidade de franjas presentes na imagem. Logo, a quantidade de franjas na imagem SAR depende da *baseline* perpendicular (B_{\perp}) entre os sistemas. As franjas cruzarão a imagem de acordo com o aumento da distância entre o sensor e o terreno entre os limites de *near* e *far range*, sendo ainda acentuado pela curvatura da Terra.

A exploração da informação de fase interferométrica requer o conhecimento da posição dos sensores no momento das aquisições para que desta forma, se possa reconstruir a geometria do sistema SAR.

Normalmente, as duas imagens são adquiridas a partir da mesma órbita do satélite, o que significa que a *baseline* (linha de base ou diferença de base) temporal mínima para interferometria de passes repetidos é igual ao ciclo orbital do satélite (24 dias para Radarsat-2, por exemplo).

Se a resposta dos alvos de uma determinada área permanecerem estáveis ao longo do tempo, pode-se trabalhar com uma *baseline* temporal medida em anos, utilizando-se interferometria. Geralmente, a maioria dos alvos perdem coerência temporalmente, corpos d'água e neve na superfície são efêmeros, areias são deslocadas, o clima e as estações do ano afetam a vegetação e a intervenção humana é responsável pela agricultura, por exemplo, tais fatores influenciam diretamente na mudança significativa da cobertura da superfície terrestre.

A perda de coerência geométrica é proporcional a *baseline* geométrica (diferença de posição do satélite entre as duas aquisições) porque quando esta aumenta, a quantidade de franjas na imagem cresce e tal alta interferência é mais sensível aos efeitos de ruído.

O valor de *baseline* perpendicular maior que 2π por célula de resolução é conhecido como *baseline* crítica, e imagens com valores superiores a estes não são utilizadas no processamento padrão InSAR.

2.2.2 Contribuições da fase

O valor de fase de uma única imagem SAR pode ser admitido como a soma dos valores devido à distância entre os alvos em alcance, a refletividade destes e o ruído presente. Ainda que a refletividade do alvo seja imprevisível, é uma quantidade determinística, logo, se duas aquisições

ocorrem em condições idênticas, os mecanismos de reflexão serão idênticos. Em termos reais, os mecanismos de reflexão são normalmente similares nas imagens, dentro destas circunstâncias a imagem pode ser considerada coerente (Hanssen, 2001).

O nível de coerência depende da correlação temporal, da geometria de *baseline* e da determinação da frequência de Doppler centróide. Para o processamento InSAR, as imagens devem estar calibradas em frequência Doppler central igual a zero.

O componente de ruído SAR é gaussiano e uma boa parte pode ser filtrada de forma eficiente. Logo, a diferença de fase (Figura 3) é principalmente dependente da diferença em alcance (Zebker *et al.*, 1994), não considerando as variações de fase relacionadas ao atraso na propagação do sinal em função da heterogeneidade da atmosfera.

A diferença de resposta dos alvos em aquisições diferentes permite que a fase interferométrica represente um parâmetro muito mais útil ao sensoriamento remoto do que o valor de fase de uma única imagem SAR.

A fase interferométrica pode ser assumida como a soma das seguintes contribuições:

- Curvatura da Terra na região imageada;
- Presença de topografia (montanhas e vales);
- Deformação do terreno entre as aquisições (subsistência, soerguimento)
- Atraso sofrido pela onda eletromagnética ao se propagar pela atmosfera
- Fase relativa ao ruído.

O modelo de fase interferométrica pode ser definido pela seguinte equação:

$$\Phi = \Phi_{\text{curvatura}} + \Phi_{\text{topografia}} + \Phi_{\text{deformação}} + \Phi_{\text{atmosfera}} + \Phi_{\text{ruído}}$$

2.2.3 Geometria InSAR

A geometria InSAR de passes repetidos (ou *repeat-pass*, quando as aquisições são realizadas em momentos diferentes pelo mesmo sensor) pode ser observada na Figura 3. As duas aquisições SAR, S_1 e S_2 , são separadas por tempo, distância de *baseline* geométrica B e *baseline* perpendicular (B_{\perp}).

Em um modelo ideal, os valores de fase em S_1 e S_2 são proporcionais à distância de todo o trajeto do sinal (ρ e $\rho + \delta\rho$), do satélite à superfície terrestre e desta de volta ao sensor (Zebker *et al.*, 1994).

2.2.4 Modelo InSAR

A descrição geométrica da fase interferométrica (Φ) começa da seguinte forma:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho$$

λ

onde λ é o comprimento de onda do sistema SAR e $\delta\rho$ representa a diferença de trajetória entre S_1 e S_2 . O termo $\delta\rho$ pode ser definido como:

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \sin(\theta - \alpha)$$

onde θ é o ângulo de visada e α representa o ângulo entre a *baseline* e a projeção horizontal em S_1 .

Rearranjando os termos, temos:

$$2\rho\delta\rho + \delta\rho^2 = B^2 - 2\rho B \sin(\theta - \alpha)$$

dividindo por 2ρ e assumindo que $\delta\rho^2 / 2\rho$ pode ser desconsiderado pela geometria SAR orbital, temos:

$$\delta\rho = \frac{B^2}{2\rho} - B \sin(\theta - \alpha)$$

2ρ

O primeiro termo à direita da equação acima é considerado negligenciável (Zebker and Goldstein, 1986) e a diferença em comprimento da trajetória é representada por:

$$\delta\rho = -B \sin(\theta - \alpha)$$

Substituindo na equação, temos:

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha)$$

λ

Na prática, determinar $\delta\rho$ em seu mais puro sentido geométrico não é possível em função da ambigüidade 2π da fase assim como erros relativos à informação de órbita. Porém, a relação entre $\delta\rho$ e θ pode ser determinada a partir da simples derivação e de um valor inicial de θ referente ao elipsóide. A descrição completa pode ser consultada em Hanssen (2001).

2.2.5 Interferometria diferencial (DInSAR) e a abordagem PSInSAR

A interferometria diferencial SAR ou DInSAR se baseia no cálculo da diferença de fase em uma base pixel por pixel, entre duas imagens adquiridas em momentos diferentes. A diferença de trajetória que origina as franjas topográficas e orbitais devem ser eliminadas com a ajuda de um modelo numérico do terreno disponível sobre a área imageada. Contrariamente às medidas obtidas in-situ, as análises e resultados DInSAR se referem à superfícies contínuas da imagem que generalizam a informação e atendem escalas mais regionais. A primeira demonstração da técnica DInSAR aplicada a detecção de deformações no solo foi apresentada por Gabriel, Goldstein et al. em 1989. Os primeiros resultados DInSAR reais foram obtidos utilizaram dados do satélite ERS-1 sobre a deformação sísmica da falha de Landers (EUA) (Massonnet, Rossi et al. 1993). A qualidade das medidas obtidas pela abordagem tradicional DInSAR é limitada pelo ruído de fase e pela contaminação da mesma pelos efeitos atmosféricos (Brisco, Short et al. 2009). As técnicas mais avançadas, como *Permanent Scatter* InSAR (Ferretti, Prati et al. 2000) ou *Point Target* InSAR (PTI)³, *Short Baseline Subset* (SBAS) (Berardino, Fornaro et al. 2000) e *Dual-Scale PTI* (Rabus e Ghuman, 2009) representam melhorias significativas em relação ao método DInSAR tradicional.

O método PSInSAR e seus derivados compensam as limitações do DinSar, pois medem a fase de alvos fixos claramente visualizados nas imagens, pois as superfícies que os compõem apresentam ângulos de inclinação próximos de noventa graus, o que permite que o feixe de microondas enviado pelo sensor retorne com bastante intensidade ao satélite, efeito conhecido como *double bounce*. Estes alvos podem ser tanto culturais como naturais. São exemplos de refletores culturais as edificações, barragens, torres, pontes, dentre outros. Como refletores naturais, pode-se citar as exposições rochosas.

³ *Point Target* InSAR (PTI) é um sinônimo de *Persistent Scatter* InSAR (PSI). Utilizamos o primeira termo neste documento por ser mais descritivo no que se refere à característica pontual da geometria do pixel. O termo PSI pode ser ambíguo, pois um *Distributed Scatterer* (DS) – descrito mais adiante neste documento - pode ser igualmente persistente ao longo do tempo.

Técnicas de PSInSar que utilizam imagens *Fine* dos satélites RADARSAT-1 e RADARSAT-2 apontam até 1000 alvos por quilômetro quadrado em áreas urbanas, como também cerca de 100 alvos por quilômetro quadrado em áreas com vegetação densa (Petrobras, 2008). O resultado da aplicação deste método permite atingir acurácia milimétrica (2-3mm), superando a precisão centimétrica (1-2cm) alcançada com o método convencional (Ferretti et al., 1999). Porém, embora a aplicação deste método permita atingir acurácia milimétrica, é necessário um grande número de imagens de satélite para que os ruídos atmosféricos sejam eliminados. Refletores de canto (*Corner Reflectors*) na utilizados na técnica conhecida como CRInSar, possibilita a minimização dos ruídos atmosféricos através de modelagens lineares e não-lineares que isolam esta influência.

2.3 Processamento InSAR

Esta seção apresenta as principais etapas que envolvem a criação de um interferograma a partir de dados no formato SLC (*Single Look Complex*).

2.3.1 Co-registro de dados

A configuração InSAR de passes repetidos se baseia na aquisição de duas ou mais imagens em momentos diferentes dos quais só se conhece as informações de órbitas até certo ponto. O momento inicial do imageamento (gravação da primeira linha em azimute) irá variar em cada aquisição, logo, ângulos e feições imageadas serão diferentes. Desta forma, serão geradas imagens com diferentes coberturas espaciais, tamanho, rotação e até respostas diferentes para os mesmos alvos. O objetivo do co-registro de imagens é determinar a transformação que deverá mapear a localização do pixel de uma dada imagem sobre uma imagem de referência.

Para fins de processamento interferométrico, as imagens devem ser co-registradas em até 0.12 do tamanho do pixel o que leva uma perda não significativa de 4% de coerência (Just and Bamler, 1994).

Um procedimento padrão é a estimativa de *offsets* entre a imagem de referência (chamada mestre) e as demais imagens (chamadas escravas). Normalmente, o processamento é dividido em duas etapas chamadas *coarse* e *fine*, como definido em Hanssen (2001).

2.3.2 Reamostragem e Interpolação

A interpolação é utilizada para determinar os valores dos pixels das imagens escravas sobre suas novas localizações. A interpolação é um procedimento que considera a precisão que se deseja alcançar e o esforço computacional exigido.

Hanssen e Bamler (1999) concluíram que a escolha de interpolador kernel ideal depende das propriedades de correlação do sinal.

Li e Bethel (2008) testaram vários algoritmos de reamostragem e concluíram que não existe um único interpolador kernel que possa ser utilizado em todas as situações de reamostragem de dados SAR.

2.3.3 Geração de Interferograma

Após a reamostragem, as imagens escravas e mestre podem ser consideradas idênticas em termos de tamanho e matrizes de valores complexos, possibilitando a formação de interferogramas a partir do produto entre o valor complexo do pixel da imagem mestre e seu conjugado correspondente na imagem escrava:

$$p(x, y) = s_1(x, y) s_2^*(x, y)$$

onde $p(x, y)$ representa o valor interferométrico do pixel localizado em (x, y) , s_1 é o valor do pixel na imagem mestre SLC e s_2 é o complexo conjugado do pixel da imagem escrava. Desta forma, os valores de amplitude são multiplicados e os valores de fase diferenciados. O resultado que também é complexo consiste no produto das amplitudes e na fase interferométrica. O interferograma da Figura 4 sobre a cidade de Nottingham na Inglaterra mostra a informação de fase como um ciclo periódico colorido (franjas) e o produto das amplitudes como brilho.

A região de baixa amplitude, especialmente a esquerda da imagem, corresponde às áreas rurais que perdem correlação muito mais rápido que a área urbana no centro da imagem. A estabilidade da amplitude ao longo tempo representa uma boa ferramenta para a análise de visibilidade das franjas interferométricas.

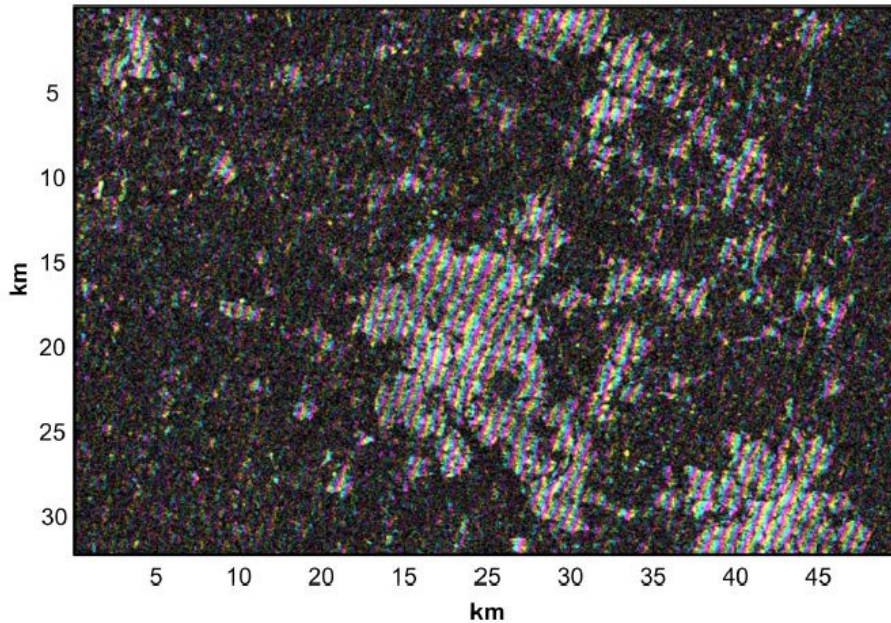


Figura 4 – Interferograma sobre a cidade de Nottingham (Inglaterra) cobrindo uma área de aproximadamente 1500km². franjas (Leighton, 2010).

2.3.4 Estimativa de coerência

A informação de coerência obtida dentro do processo de criação do interferograma permite medir o nível de correlação de dois sinais correspondentes entre o valor mínimo de zero (onde não há correlação) ao máximo de 1 (correlação perfeita). A informação de coerência é útil apenas quando analisada dentro de um determinado intervalo de tempo ou espaço (Woodhouse, 2006). A coerência como medida de correlação de fase entre duas imagens SAR S_1 e S_2 pode ser definida como:

$$\gamma_{S_1 S_2} = \frac{|\langle S_1 S_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle |S_1|^2 \rangle \langle |S_2|^2 \rangle}}$$

Onde S_1 e S_2 representam os valores complexos dos pixels das duas cenas e $\langle \rangle$ representa a média.

Como as estruturas urbanas normalmente se modificam muito mais lentamente do que a vegetação, normalmente altos valores de coerência são encontrados em cidades e aglomerados urbanos, enquanto a floresta, por exemplo, apresenta valores muito baixos (Figura 5).

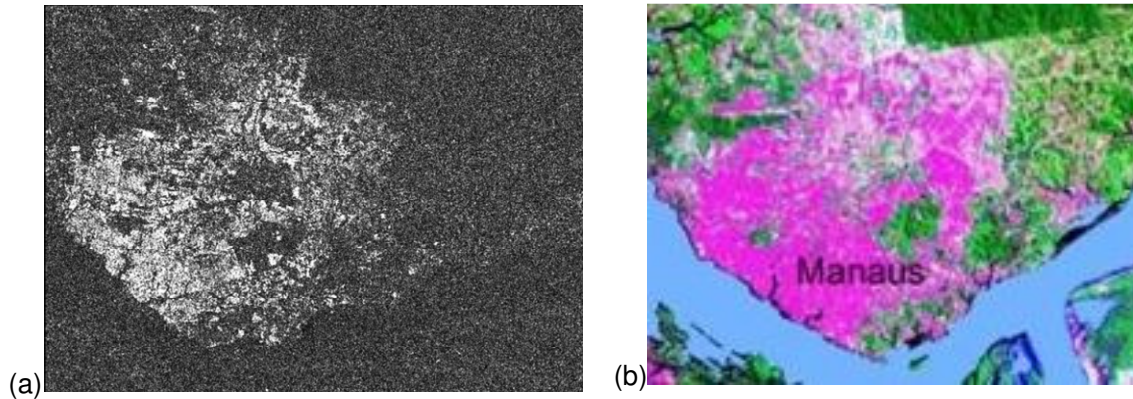


Figura 5 – (a) Imagem de coerência sobre a área de Manaus, interferograma Radarsat-1, datas de aquisição: 23 de outubro de 2006 e 5 de dezembro de 2007. Baseline perpendicular = 40m; (b) Imagem do satélite Landsat sobre aproximadamente a mesma área.

É possível notar que os valores mais altos de coerência estão associados aos tons mais claros e concentrados sobre a área urbana de Manaus (em rosa na imagem b). O entorno da cidade apresenta valores de coerência próximos de zero (tons escuros) devido à presença da floresta e dos rios que a limitam geograficamente.

2.3.5 Filtragem

Pode-se dizer de forma geral que a filtragem atenua frequências que estejam fora de um determinado intervalo de interesse, e é normalmente utilizada para reduzir o ruído gaussiano. Filtros bidimensionais especificados em termos de normalização central de frequências são comumente utilizados em interferometria SAR.

Métodos de filtragem adaptativa estão se tornando cada vez mais comuns no processamento InSAR. Estes constituem filtros sem um valor fixo de impulso e que se adaptam aos dados a partir de características como SNR (*Signal-to-noise-ratio*, ou relação sinal/ruído), coerência, quantidade de franjas, gradiente do terreno, dentre outros (Goldstein e Werner, 1998). A abordagem é baseada na aplicação de filtragem sobre as áreas que mais necessitam, preservando as áreas menos afetadas pelo ruído, otimizando assim o aproveitamento e precisão dos resultados.

2.3.6 Multilooking

A técnica de *Multilooking* representa uma média espacial das componentes complexas do sinal e é aplicada sobre os interferogramas complexos a partir de uma janela média determinada no sentido de reduzir a variação estatística do ruído.

O tamanho do pixel do interferograma aumenta na mesma proporção e respectiva direção, porém a estatística de valores de fase apresenta melhora significativa (Lee *et al.*, 1994), pois o desvio padrão da fase estimada é proporcional ao número de pixels sobre os quais a média é computada. O ruído da fase interferométrica pode ser calculado a partir do número de *looks* e da coerência do interferograma. O *multilooking*, assim, pode melhorar a confiabilidade do desdobramento de fase (Goldstein *et al.*, 1988), ao mesmo tempo em que reduz a resolução espacial. A Figura 6 apresenta um exemplo de interferogramas processados em *multilooking* e o gráfico correspondente aos valores de desvio padrão da fase interferométrica.

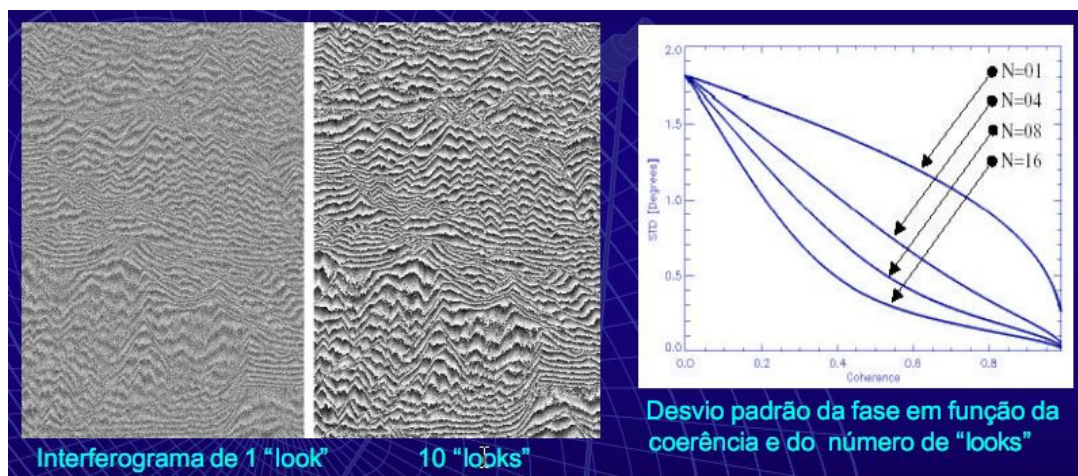


Figura 6 – Interferogramas processados com 1 e 10 *looks*. O gráfico apresenta a relação entre o desvio padrão da fase e o número de *looks* (N).

A etapa de *multilooking* normalmente é utilizada dentro do processamento InSAR mais de uma vez, entre as demais etapas. O número de *looks* deve ser adequado ao objetivo de cada aplicação, assim como às características do sensor utilizado e do comportamento da fase em diferentes cenários geográficos. Para a correção de *baseline* geométrica, por exemplo, utiliza-se valores mais altos como 8 x 2 (alcance x azimute). Para a análise de interferogramas finais, preservando ao máximo a resolução dos dados, deve-se trabalhar com janelas menores como 2 x 3 ou outra compatível com a resolução da análise. É importante que o número de looks tenha razão igual a 1 para a obtenção de

pixels quadrados. Para os dados ENVISAT, por exemplo, recomenda-se janelas na razão de 1 para 5 ou 2 para 10, esta última corresponde a média de duas vezes em alcance e dez em azimute, pois resultam em pixels de valores quadrados.

2.3.7 Desdobramento de fase

Como dito anteriormente, a informação espacial deve ser determinada pela diferença angular entre as duas aquisições SAR, o que equivale à medida cumulativa da diferença angular de fase entre células de resolução vizinhas em um interferograma SAR (Hanssen, 2001).

Como a fase interferométrica conhecida é modulo 2π , deve-se adicionar um número inteiro de ciclos 2π para determinar a diferença absoluta de fase. A relação entre módulo da fase e fase absoluta é ilustrada na Figura 7 abaixo. A parte superior do diagrama representa a medida do módulo da fase original (dobrada ou *wrapped*) em um interferograma com saltos (dentes) de 2π . A parte inferior representa a reconstrução mais suave da fase após o processo de desdobramento. Neste exemplo, a informação de fase não possui contribuições de ruído e nem descontinuidades, podendo ser visualizada unidimensionalmente (1D). Porém, na realidade, existem uma série de fatores que tornam o desdobramento de fase (ou *unwrapping*) um dos maiores desafios computacionais em InSAR. Tais fatores remetem aos conceitos de processamento de sinal, onde sinais reais contínuos devem ser amostrados e convertidos em sinais digitais para fins de processamento e uma taxa de amostragem adequada é necessária para representar o sinal original satisfatoriamente (Ghiglia e Pritt, 1998). Logo, em uma etapa posterior, o ideal é reconstruir a forma contínua original dos dados a partir de amostras discretas.

Se os dados forem completos, sem erros e amostrados em uma taxa adequada o suficiente, a reconstrução depende apenas do esforço computacional. Porém, em muitos cenários reais, o sinal não pode ser perfeitamente reconstruído e o desdobramento de alguns interferogramas não alcança um grau aceitável de confiabilidade.

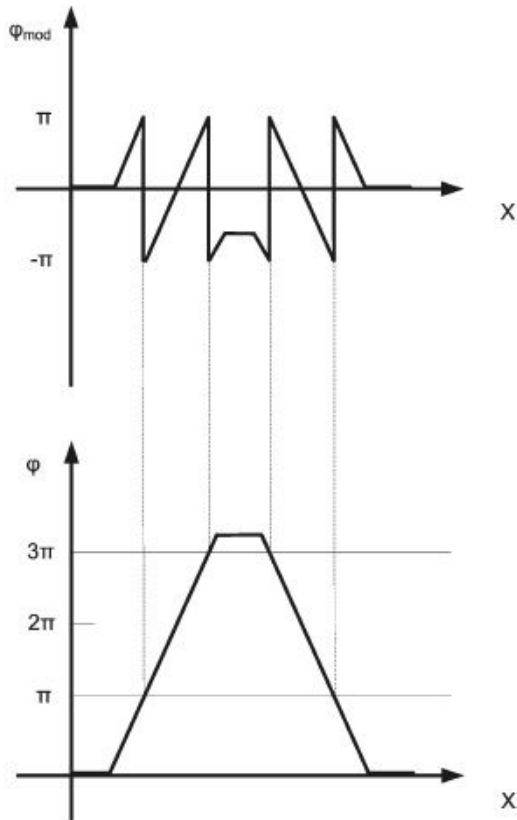


Figura 7 - O gráfico superior apresenta a fase interferométrica módulo 2π *wrapped* entre dois pontos e o gráfico inferior representa a reconstrução da fase após a etapa de desdobramento (*unwrapping*).

De acordo com Zebker *et al.* (1994), o desempenho do algoritmo de desdobramento de fase depende de dois fatores: o SNR (*signal-to-noise-ratio*) do interferograma e o espaçamento entre as franjas interferométricas. As duas abordagens principais para o desdobramento de fase são métodos locais e globais. Os métodos locais incluem algoritmos baseados nos resíduos (*residue-based algorithms*), como proposto por Goldstein *et al.* (1988), e em crescimento de regiões. O objetivo é identificar e isolar os pontos onde há inconsistência de fase, para que se evite a propagação de erro durante o desdobramento.

Os métodos globais buscam minimizar o erro global através, por exemplo, do método de mínimos quadrados proposto por Zebker e Lu (1998) e de técnicas multi-resolução, dentre outros.

Em contraste com o exemplo da Figura 7, a fase é sempre desdobrada em duas direções ortogonais. Os gradientes entre pixels adjacentes na imagem são computados e integrados em uma determinada trajetória, desta forma, o interferograma resultante descreve os valores de fase relativos a um ponto inicial. Os efeitos dos sinais atmosféricos, os baixos valores de coerência,

descontinuidades das franjas, decorrelação temporal e *baselines* perpendiculares grandes interferem neste processamento.

Um estudo bem completo sobre desdobramento de fase pode ser consultado em Ghiglia and Pritt (1998).

2.3.8 Stacking

A etapa conhecida como *Stacking* consiste na combinação de múltiplos interferogramas sobre a mesma área de estudo. Um dos desafios da interferometria tradicional é o grande número de parâmetros que devem ser estimados com base em um número relativamente pequeno de observações. O *Stacking* envolve basicamente a aplicação de uma média sobre o conjunto de interferogramas no sentido de melhorar a relação SNR (Sandwell e Price, 1998).

Assumindo que o erro estatístico para todos os interferogramas da série é o mesmo, a qualidade da relação SNR melhora porque as fases interferométricas desenvolvidas dos interferogramas são adicionadas linearmente (por exemplo, interferogramas de um ou dois anos de *baseline* temporal resultam em valores de fase desdobrada que cobrem um intervalo de três anos) enquanto os valores de erro apenas aumentam com a raiz quadrada do número de pares.

Desta forma, é possível afirmar que o desvio padrão dos valores de fase de qualquer interferograma é proporcional ao inverso do tempo acumulado do intervalo considerado (Wegmuller *et al.*, 2000):

$$\sigma(\Phi_i) = \frac{\sigma(\Phi)}{\Delta T_i}$$

Onde $\sigma(\Phi_i)$ é o desvio padrão de fase do interferograma i , e ΔT é o intervalo de tempo cumulativo. Quando ΔT aumenta, $\sigma(\Phi_i)$ diminui. A estimativa de média do termo Φ_i de qualquer ponto dentro do conjunto de interferogramas é dado por:

$$\Phi_i = \sum w_i \Phi_i$$

Onde w_i representa os pesos derivados do quadrado dos intervalos de tempo dos interferogramas individuais. O *Stacking* não requer uma imagem de referência (mestre), logo, pares arbitrários com *baselines* perpendiculares e temporais adequadas podem ser selecionados. O *Stacking* pode ser utilizado ainda para a geração de filtros que inibem os efeitos do ruído (Wegmuller *et al.*, 2000), e para melhorar a razão entre o sinal relativo a subsidência e o erro atmosférico, como será posteriormente neste documento.

3. Processamento InSAR RADARSAT-1 sobre Manaus (AM)

Nesta seção, será apresentado o processamento interferométrico realizado sobre o conjunto de dados do satélite Radarsat-1 obtido na área de Manaus, Estado do Amazonas. O conjunto de 15 imagens em formato *Single Look Complex* foi co-registrado no *software* comercial Gamma (Wegmüller e Werner, 1997) e as demais etapas realizadas principalmente no conjunto de programas de distribuição livre EFIDIR Tools (www.efidir.fr). O objetivo principal da aplicação de InSAR sobre os dados Radarsat-1 em Manaus consiste em explorar as diferentes abordagens do processamento, a fim de identificar as principais fontes de erros e os atributos significativos que devem ser analisados sob a perspectiva temporal da série de imagens. Este estudo foi realizado durante o período de estágio de doutorado na Université de Savoie (França), entre abril de 2010 e outubro de 2011.

3.1 Dados utilizados

A Tabela 1 apresenta informações sobre o modelo digital de elevação SRTM e as imagens SLC do satélite Radarsat-1 utilizados neste estudo.

Sensor	SRTM	Radarsat 1 Fine (ano/mês/dia)
Data	2001	20060812 20070409 20070807
(ano/mês/dia)		20060929 20070503 20070924
		20061023 20070527 20071018
		20061116 20070620 20071111
		20061210 20070714 20071205
Track	2905-2622	235-A
Resolução	90m	8m

Tabela 1 – Características principais dos dados SRTM e Radarsat-1 utilizados na pesquisa.

3.2 Metodologia

O tratamento interferométrico dos dados RADARSAT-1 compreende as seguintes etapas:

- a) Análise dos pares interferométricos, segundo o *aliasing* de franjas e seus valores de coerência, *baseline* perpendicular e temporal;
- b) Transformação entre as geometrias radar e solo (conversão de *slant* para *ground range*);
- c) Simulação e subtração das franjas orbitais e topográficas;
- d) Filtragem e redução de escala;
- e) Estimativa de frequência local das franjas interferométricas;
- f) Detecção da principal feição encontrada – possível zona de deformação de terreno;
- g) Desdobramento de fase e análise estatística (medida da deformação).

A Figura 8 apresenta o fluxograma que descreve as principais etapas da metodologia utilizada.

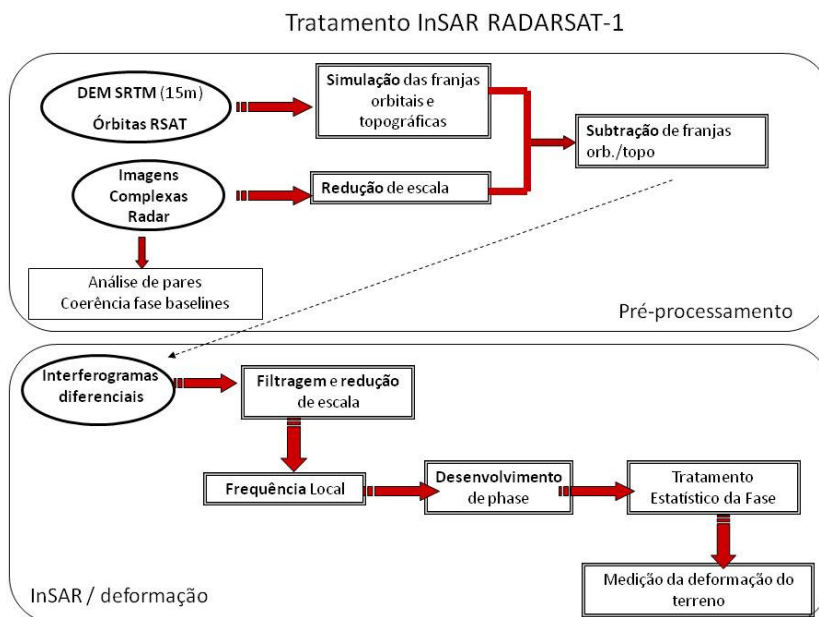


Figura 8 – Metodologia de processamento interferométrico do dados Radarsat-1.

As imagens RADARSAT utilizadas são originárias de um tratamento inicial realizado no *software* Gamma que gera dois arquivos de extensões *.rslc* e *.rslc.par*. O arquivo de extensão *.rslc.par* contém as informações que serão utilizadas no processamento tais como vetores de velocidade e outros parâmetros do satélite no momento de aquisição das imagens. As imagens foram co-registradas em geometria *Common Master*, onde uma imagem do centro da série temporal é escolhida como referência (mestre) para a reamostragem das demais cenas (escravas).

3.3 Análise de pares interferométricos: coerência, fase (análise de *aliasing*) e *baseline* perpendicular

Coerência

Os fatores que influenciam os valores de coerência para um determinado par interferométrico são principalmente: (a) existência de densa cobertura vegetal sobre a área de estudo, pois a vegetação está em constante mudança de posição em função de seu crescimento e da ação do vento; (b) existência de variações do teor de umidade nos alvos (vegetação, solo) da área de estudo, em razão de chuvas recentes, por exemplo; (c) deslocamento do satélite ao adquirir imagens sob a mesma órbita; (d) influência atmosférica (principalmente troposférica); (e) diferença de ângulo de incidência local; e (f) grande intervalo temporal entre as aquisições.

No caso do estudo InSAR sobre Manaus utilizando-se os dados do satélite Radarsat-1, a maioria dos fatores citados acima foram identificados. A existência de grande cobertura vegetal no entorno da cidade, a presença quase constante de chuvas na região, a falta de precisão das órbitas do satélite Radarsat-1 em conjunto com as grandes *baselines* perpendiculares e falta de calibração de Doppler centróide (diferença de ângulo local) e principalmente a complexidade da dinâmica atmosférica sobre esta área tropical, fazem deste estudo de caso um grande desafio para o processamento InSAR.

Os pares interferométricos processados apresentam, em geral, valores baixos de coerência dentro da área urbana e perda total de coerência em seu entorno onde estão localizados a floresta amazônica e seus grandes rios.

A Figura 9 apresenta as imagens de coerência e de amplitude, respectivamente, para a área estudada.

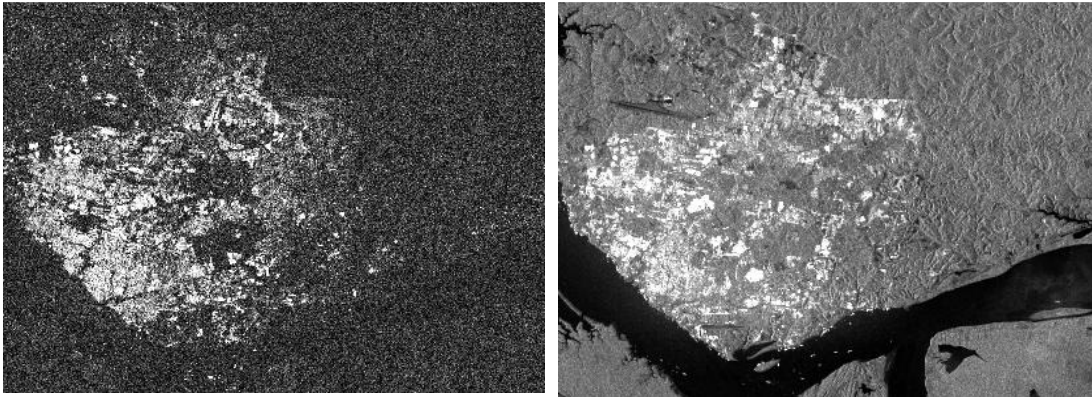


Figura 9 - Imagem de coerência (esquerda) e amplitude (direita) para o par formado entre as imagens de 16 de novembro de 2006 e 5 de dezembro de 2007. Baseline temporal de 384 dias e baseline perpendicular de 5m.

Fase

A partir das imagens SLC co-registradas, é possível analisar e seleccionar os pares de acordo com seus valores de coerência, *baseline* perpendicular temporal e *Aliasing* das franjas. O *Aliasing* é o nome que se dá ao efeito decorrente da amostragem insuficiente de um sinal contínuo qualquer, logo, representa o efeito indesejável ocasionado pela reamostragem de um sinal de alta frequência em baixas resoluções. O *Aliasing* (traduzido na literatura como disfarce) ou dobramento espectral ocorre quando a taxa de amostragem usada é menor que a taxa de Nyquist do sinal que se está analisando. Neste estudo, diferentes valores de janelas de reamostragem foram testados no sentido de evitar o efeito de *aliasing*.

Baseline Perpendicular

Os valores de *baseline* perpendicular do centro da imagem foram calculados a partir das ferramentas EFIDIR para os 57 pares que representam todas as possibilidades de combinações de datas com valores de *baseline* inferior a 750m. Tais pares foram gerados utilizando-se diferentes cenas mestres

como pode ser observado na Tabela 2 que apresenta ainda a distribuição de valores de *baseline* perpendicular e temporal para os 57 pares interferométricos considerados no estudo.

MESTRE (aaaammdd)	ESCRAVA (aaaammdd)	Baseline Perp (m)	Baseline Temp (dias)
20060812	20061023	-369,8975	72
20060812	20061116	-416,2872	96
20060812	20061210	193,108	120
20060812	20070409	640,2075	240
20060812	20070527	732,4662	288
20060812	20070714	571,0977	336
20060812	20070924	-626,113	408
20060812	20071018	-458,7222	432
20060812	20071111	-14,5741	456
20060812	20071205	-410,5084	480
20060929	20061210	-644,0253	72
20060929	20070409	-196,9258	192
20060929	20070527	-104,6671	240
20060929	20070714	-266,0356	288
20061023	20061116	-46,3897	24
20061023	20061210	563,0055	48
20061023	20070503	-614,1591	192
20061023	20070807	-419,9735	288
20061023	20070924	-256,2155	336
20061023	20071018	-88,8247	360
20061023	20071111	355,3234	384

20061023	20071205	-40,6109	408
20061116	20061210	609,3952	24
20061116	20070503	-567,7694	168
20061116	20070807	-373,5838	264
20061116	20070924	-209,8258	312
20061116	20071018	-42,435	336
20061116	20071111	401,7131	360
20061116	20071205	5,7788	384
20061210	20070409	447,0995	120
20061210	20070527	539,3582	168
20061210	20070714	377,9897	216
20061210	20071018	-651,8302	312
20061210	20071111	-207,6821	336
20061210	20071205	-603,6164	360
20070409	20070527	92,2587	48
20070409	20070714	-69,1098	96
20070409	20071111	-654,7816	216
20070503	20070620	-252,4147	48
20070503	20070807	194,1856	96
20070503	20070924	357,9436	144
20070503	20071018	525,3344	168
20070503	20071205	573,5482	216
20070527	20070714	-161,3685	48
20070527	20071111	-747,0403	168
20070620	20070807	446,6003	48
20070620	20070924	610,3583	96
20070714	20071111	-585,6718	120

20070807	20070924	163,758	48
20070807	20071018	331,1488	72
20070807	20071205	379,3626	120
20070924	20071018	167,3908	24
20070924	20071111	611,5389	48
20070924	20071205	215,6046	72
20071018	20071111	444,1481	24
20071018	20071205	48,2138	48
20071111	20071205	-395,9343	24

Tabela 2 – Datas das imagens e valores de *baseline* perpendicular e temporal para os 57 pares selecionados.

O mínimo valor de *baseline* perpendicular encontrado foi de 8,04m e o máximo de - 747,04m. Dentre os 57 pares, apenas 5 apresentam a *baseline* temporal mínima de 24 dias referente ao ciclo do satélite Radarsat-1.

Para observação das franjas orbitais e topográficas é necessário calcular uma imagem de diferença de distância. A imagem resultante contém os efeitos da topografia, bem claros no exemplo da Figura 10 sobre as geleiras do vale de Chamonix, Alpes Franceses (cerca de 3.000m de altitude) assim como as franjas orbitais com maior destaque sobre a zona plana de Manaus (100m de altitude).

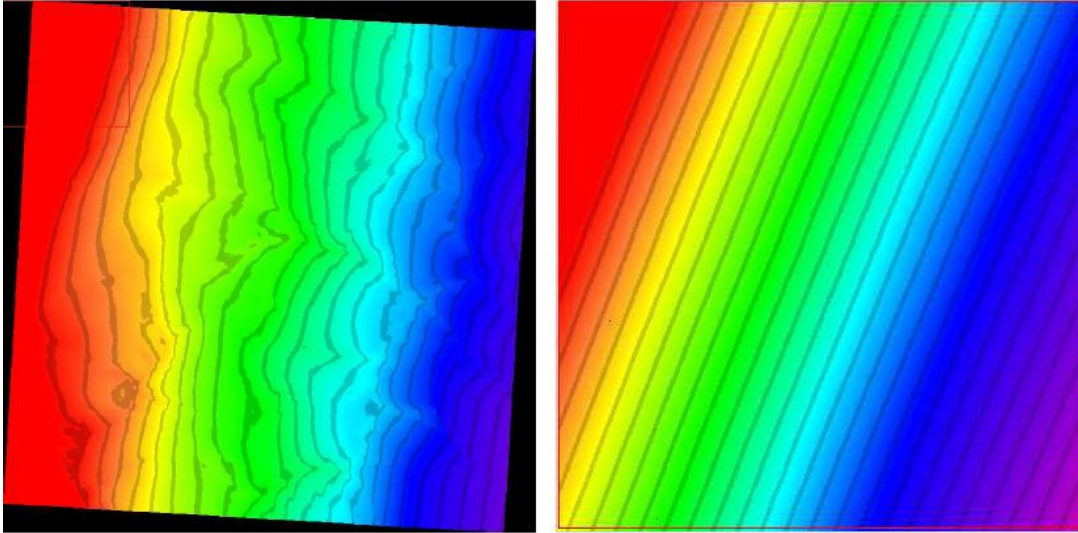


Figura 10 – Imagem de diferença de distâncias : (a) vale de Chamonix, Alpes Franceses ; (b) área de Manaus, Amazonas.

3.4 Transformação entre as geometrias radar e solo

O Modelo Digital de Elevação (MDE ou DEM em inglês) é um dado indispensável no tratamento de imagens de radar, em particular, na conversão entre as geometrias do sensor radar (*slant range*) e a geometria do terreno (*ground range*). Esta etapa consiste em calcular para cada ponto do MDE sua projeção sobre a trajetória do satélite e deduzir igualmente o tempo de aquisição, ou seja, o instante t sobre a trajetória do satélite onde o alvo é visto perpendicularmente (considerando a calibração em zero *Doppler*). As informações principais necessárias à conversão são: (a) as coordenadas tridimensionais dos pontos no terreno considerando a georreferência do MDE; (b) a trajetória emulada do sensor descrita por cada imagem.

A distância entre o ponto no terreno e cada ponto na trajetória do satélite em relação ao tempo é uma função quadrática. Conhecendo a distância entre o alvo no terreno e sua projeção sobre a trajetória do satélite assim como o tempo de aquisição pode-se obter a posição do ponto do MDE na imagem Radarsat. Isto é possível pois a frequência de amostragem em alcance é conhecida e indica a distância em alcance e o tempo de aquisição da primeira e última colunas da imagem.

A precisão da conversão entre geometria radar e solo é diretamente proporcional à qualidade e resolução espacial do MDE e irá influenciar a acurácia dos resultados finais do estudo InSAR. Esta questão é mais crítica em áreas de relevo significativo, onde a presença de distorções SAR (*layover*, *forshortening* e sombra) são observadas, o que não é o caso da cidade de Manaus.

3.5 Simulação e subtração de franjas orbitais e topográficas

A simulação de franjas orbitais e topográficas a partir das informações de órbita do satélite Radarsat-1 e do MDE da área de interesse pode ser descrito a partir das seguintes etapas:

- (a) extração das informações de *state vector* (ou vetor de velocidade e tempo) e emulação da órbita para cada imagem a partir de um modelo polinomial;
- (b) geração das imagens de tempo de aquisição e de distância entre as órbitas e o terreno utilizando-se MDE e abordagem CPA (*Closest Point of Approach*). Neste caso considera-se a hipótese de zero Doppler;
- (c) conversão das imagens de distância e tempo em coordenadas SAR (alcance e azimute) para derivar as LUTs (*look-up tables*, tabelas de novos valores para as imagens tratadas);
- (d) Cálculo da *baseline* ortogonal considerando a abordagem CPA e o ângulo de incidência local das imagens;
- (e) Co-registro entre a imagem de referência (mestre) e as demais (escravas) a partir de interpolação 1D ou 2D baseada nas diferenças em alcance e azimute;
- (f) Conversão das diferenças de distância em franjas simuladas e sua projeção em geometria radar.
- (h) Subtração de franjas com filtragem e mudança de escala, caso necessário.

As ferramentas utilizadas nas etapas acima foram implementadas na plataforma de distribuição livre EFIDIR *Tools* que permite o processamento interferométrico diferencial (DInSAR, que considera toda a imagem e não alvos pontuais) para diferentes formatos de dados como *xml* (utilizado pelos sistemas SAR de nova geração), assim como arquivos auxiliares gerados pelos programas Gamma e ROIPAC.

Tal seqüência de processamento foi aplicada aos dados dos satélites Radarsat-2, TerraSAR-X e Radarsat-1, ainda que este ultimo não forneça informações precisas de órbita. O grau do polinômio citado na etapa (a) acima é um parâmetro de entrada definido pelo usuário e deve ser adaptado ao número de *state vectors* disponíveis no arquivo de metadados, por exemplo grau 7 para imagens TerraSAR-X e 4 ou menor para o satélite RADARSAT-2 (Ramos *et al.*, 2011, FRINGE)

Como objetivo final, essa etapa do processamento permite a identificação das franjas remanescentes, ou seja, franjas relativas aos efeitos atmosféricos e/ou deformação de terreno. A Figura 11 apresenta um exemplo de subtração de franjas orbitais e topográficas para um interferograma de Manaus. A primeira imagem representa a fase inicial do interferograma formado pelas imagens de 23 de outubro de 2006 e 18 de outubro de 2007, 88m de *baseline* perpendicular. A segunda imagem consiste na simulação das franjas orbitais e topográficas a partir do procedimento descrito acima e a última imagem representa o interferograma final onde são presentes as demais contribuições de fase como: efeitos atmosféricos, deformação do terreno, ruído e possíveis resíduos relativos aos erros de órbita e do MDE.

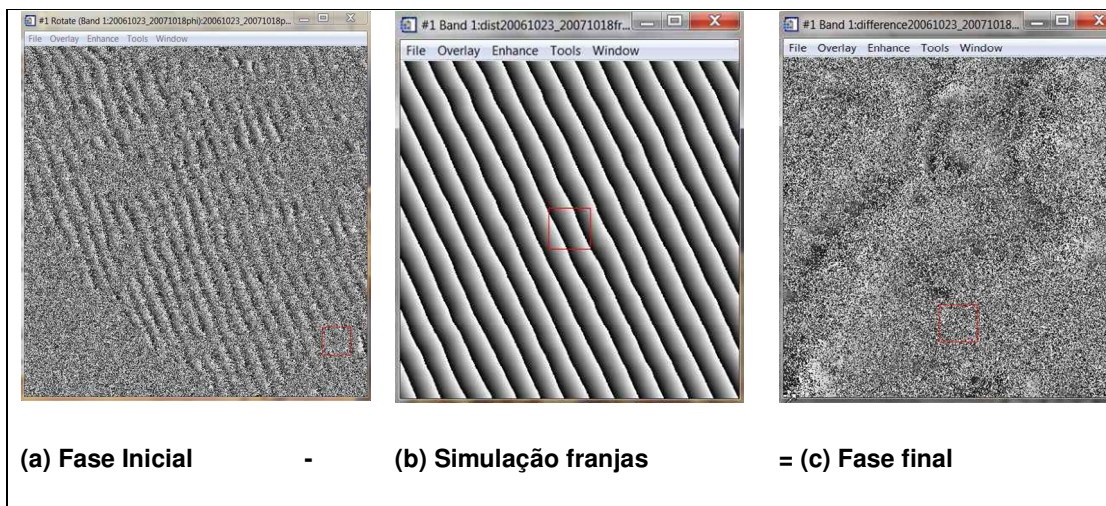


Figura 11 – (a) Interferograma Inicial; (b) simulação de franjas orbitais e topográficas; (c) Interferograma final, resultado de (a) – (b).

3.6 Filtragem e Redução de escala

Como já citado anteriormente, a filtragem dos interferogramas permite a suavização do ruído das imagens SAR (*speckle*) presente em tais produtos, como é possível observar na Figura 11 (c). A filtragem de interferogramas pode ser realizada a partir de três métodos principais: (a) filtros de média, moda e P-ASF, conhecidos como não adaptativos e por trabalharem com janelas fixas não consideram a periodicidade dos dados InSAR, logo, são raramente utilizados; (b) filtros adaptativos, que consideram a orientação das franjas, cuja aplicação deve ocorrer sobre os valores de fase já desdobrados, constituindo um método custoso em tempo de processamento; (c) filtro de *multilooking* e filtros vetoriais, considerados os mais adequados, visto que mapeam o interferograma original em vetores e os transformam em campo de frequência através de FFT (Transformada de Fourier).

Diferentes abordagens foram testadas neste estudo. Como resultado, foi selecionado o filtro de *multilooking*, com janela de 5 x 5, bem como a redução de escala (*rescaling* ou redução proporcional da imagem) em fator 3. A Figura 12 ilustra os resultados da filtragem e redução de escala.

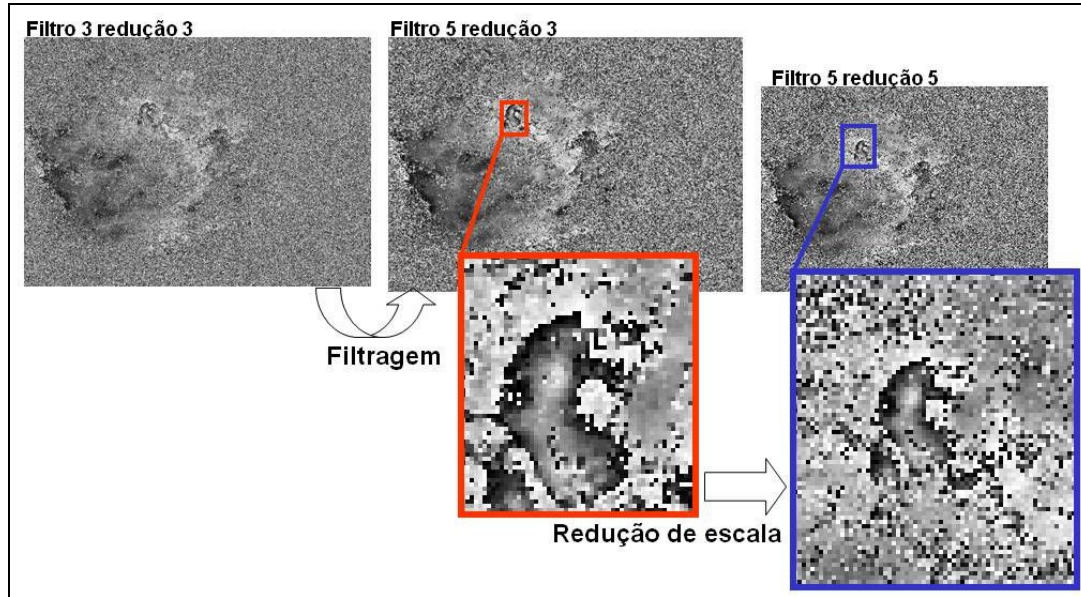


Figura 12– Filtragem e redução de escala sobre interferograma Radarsat-1 de Manaus.

3.7 Geração de frequência local das franjas interferométricas

A influência do ruído sobre a estimativa de valores de fase, e a falta de um padrão regular nas franjas interferométricas representam as maiores dificuldades para a etapa de desdobramento de fase.

Como visto anteriormente, o ruído que afeta a estimativa de valor de fase é mais significativo, ou seja, tende a aumentar, quando a correlação entre duas imagens SAR diminui. Neste caso, o padrão de franjas existe porém é poluído pelos artefatos de ruído na imagem, o que dificulta o desdobramento da fase interferométrica. Outro fator decisivo para o *unwrapping* é a descontinuidade das franjas, que ocorre normalmente em áreas onde o valor de coerência é próximo a zero, como em regiões de alto relevo onde a distorção geométrica SAR provoca efeitos conhecidos como *layover*, *forshortening* e sombreamento. A Figura 13 apresenta os dois exemplos.

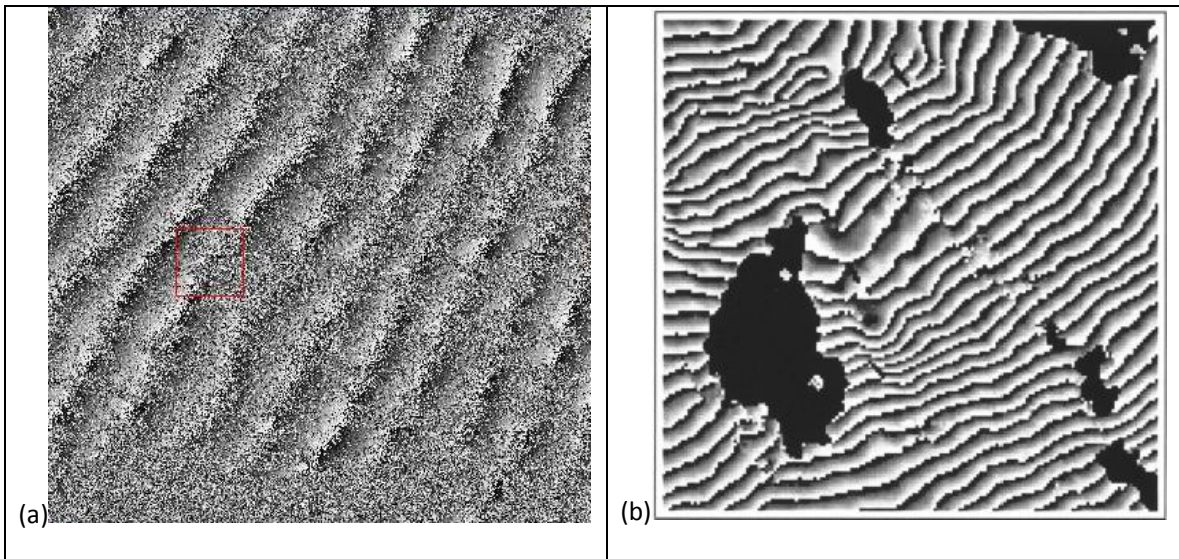


Figura 13– (a) Interferograma Radarsat-1 de Manaus com franjas poluídas pelo ruído; (b) interferograma da área do vulcão Etna na Itália, onde efeitos de *layover* e áreas sem coerência interrompem o padrão de franjas (Trouvé, 1996).

O programa MUSIC (*multiple signal classification*) (Stoica e Nehorai, 1989) adaptado por Trouvé *et al.* (1996) e implementado na plataforma de distribuição livre EFIDIR Tools permite a estimativa de frequência local bidimensional (2D) sobre as franjas ainda dobradas ou *wrapped*. A estimativa é calculada nas direções de f_x e f_y , assumindo-se que o sinal de fase (s) é determinístico e pode ser localmente modelado por uma onda senoidal complexa 2D (Trouvé, 1996). Além dos valores de frequência das franjas interferométricas, o programa MUSIC também calcula uma imagem de confiança necessária para detectar as reais discontinuidades ou ausência do padrão de franjas. É possível definir ainda uma máscara de *threshold* para isolar áreas com ausência de informação, caso seja necessário.

Outros programas permitem a exploração visual da informação de frequência local, sendo possível visualizar em cores as diferentes orientações das franjas e a largura das mesmas (Figura 14 a).

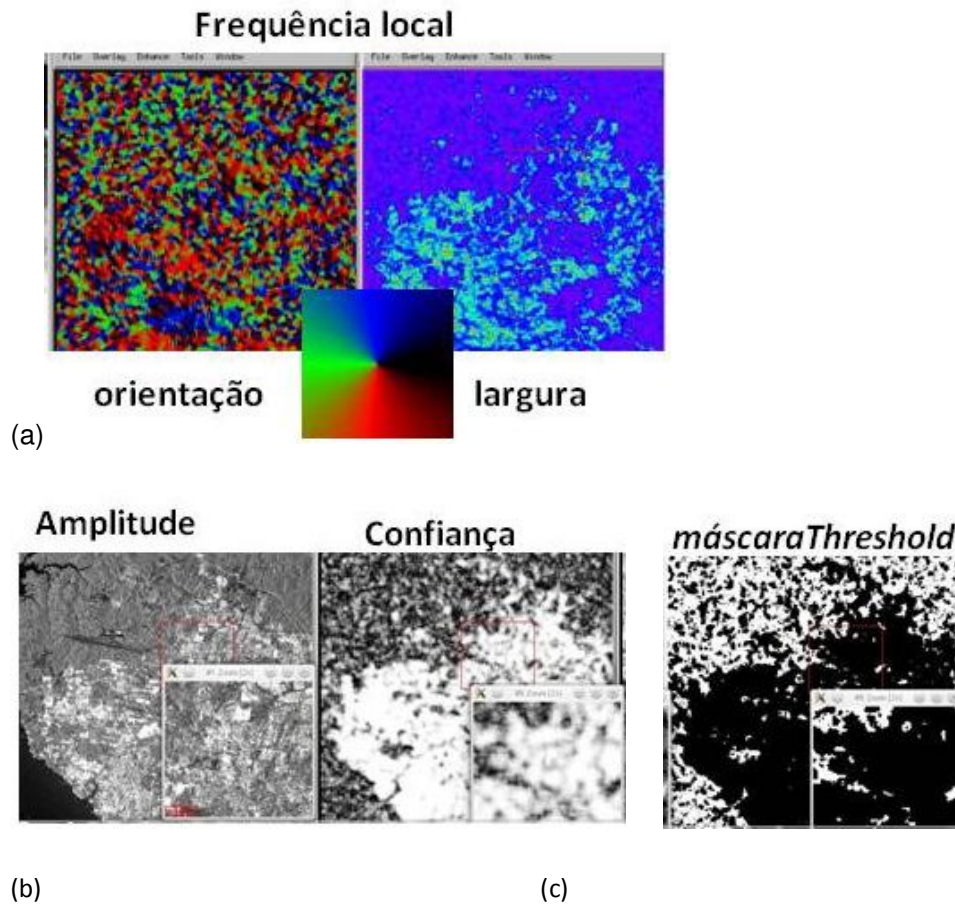


Figura 14– Resultados do programa MUSIC sobre os dados de Radarsat-1 de Manaus; (a) Imagens de orientação e largura das franjas ; (b) Imagem de amplitude e de confiança; (c) Máscara *threshold*.

3.8 Detecção da principal feição interferométrica

Um dos principais objetivos deste estudo, como citado anteriormente, é identificar e analisar uma feição interferométrica que em Ramos (2009) é denominada de AMC ou área de movimento crustal. Tal feição (aproximadamente 8km^2 de área) indica uma área de possível deformação de terreno localizada entre o aeroporto de Manaus e uma anomalia circular de drenagem (4km de diâmetro). A Figura 15 apresenta a AMC em detalhe sobre o interferograma gerado a partir das imagens adquiridas em 16 de novembro de 2006 e 5 de dezembro de 2007 (*baseline* perpendicular de 5,7m).

(a)

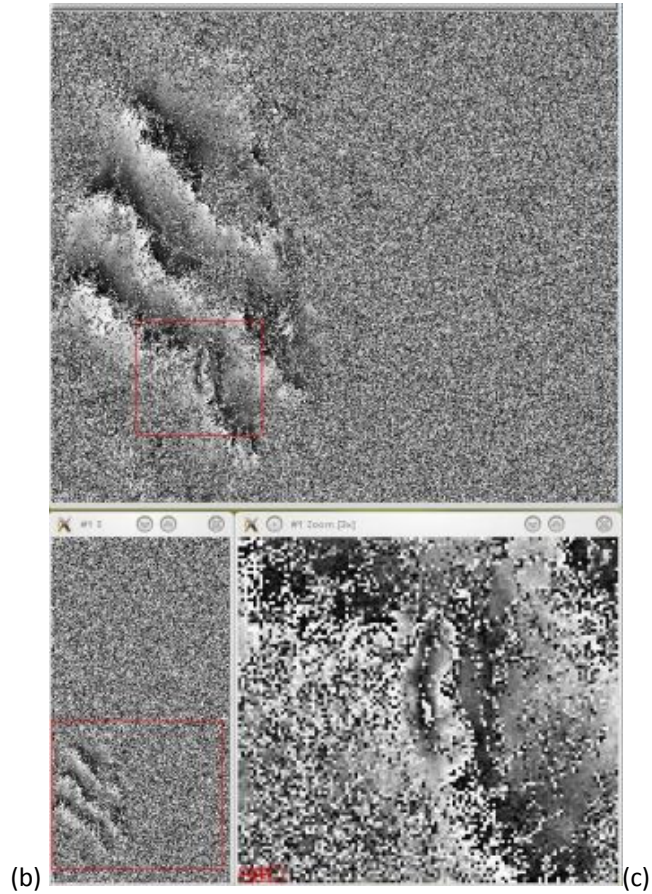


Figura 15– (a) detalhe do padrão de franjas do interferograma Radarsat-1 (16/nov/2006 – 05/dez/2007) que pode ser visualizado em sua totalidade em (b). A figura (c) apresenta a feição interferométrica denominada de AMC.

O interferograma acima representa a informação de fase original, ou seja, todas as contribuições ainda estão presentes, apesar de a baseline geométrica ser muito pequena (5,7m). Mesmo após a subtração das franjas orbitais e topográficas é possível identificar a AMC (Figura 16).

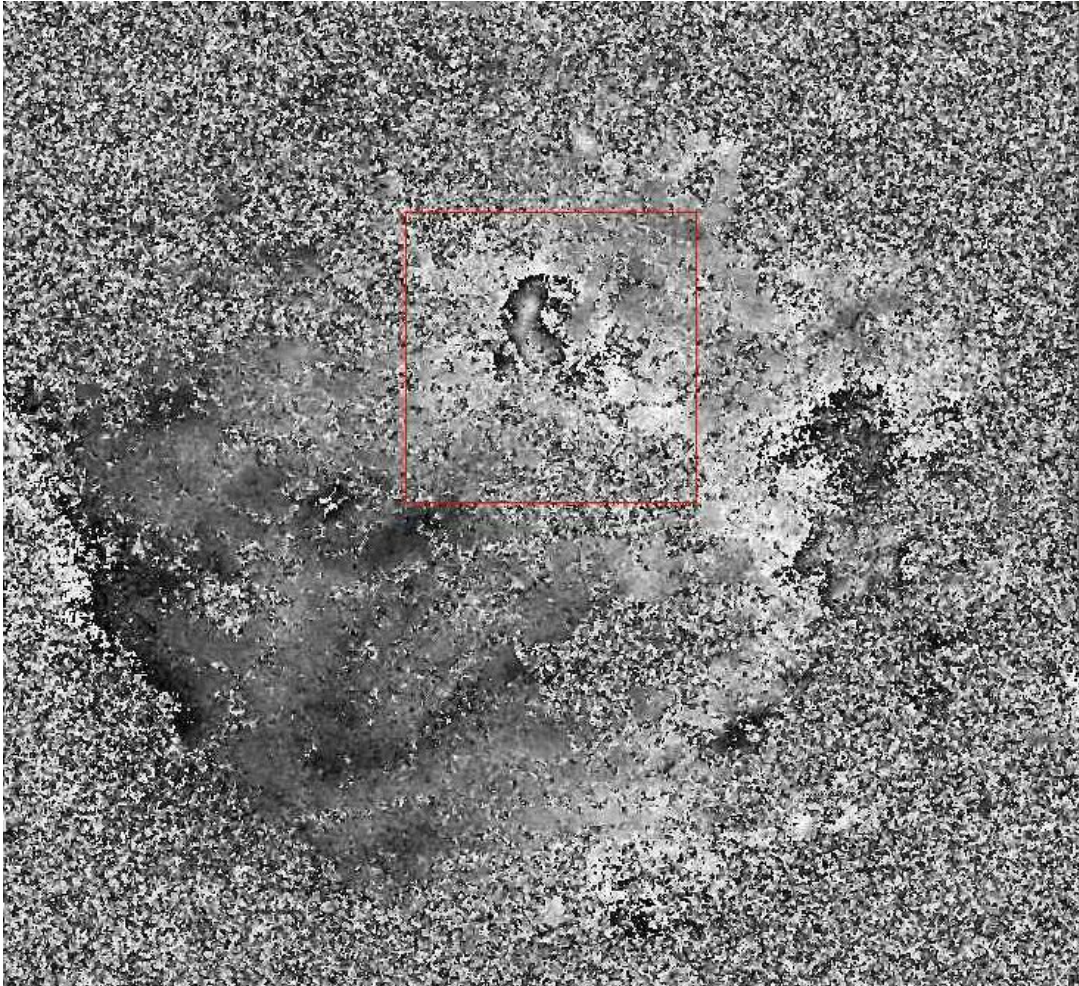


Figura 16– Interferograma (16/nov/2006 – 05/dez/2007) resultante da subtração de franjas orbitais e topográficas. AMC em detalhe no polígono em vermelho

Dentre os 22 pares interferométricos processados e reamostrados em *multilooking* 2 x 3, em 12 é possível claramente identificar a AMC. A Tabela 3 apresenta as datas e características dos pares selecionados (Figura 17). Note que os interferogramas possuem datas independentes, o que exclui a possibilidade de tal de feição ser originada por efeitos atmosféricos.

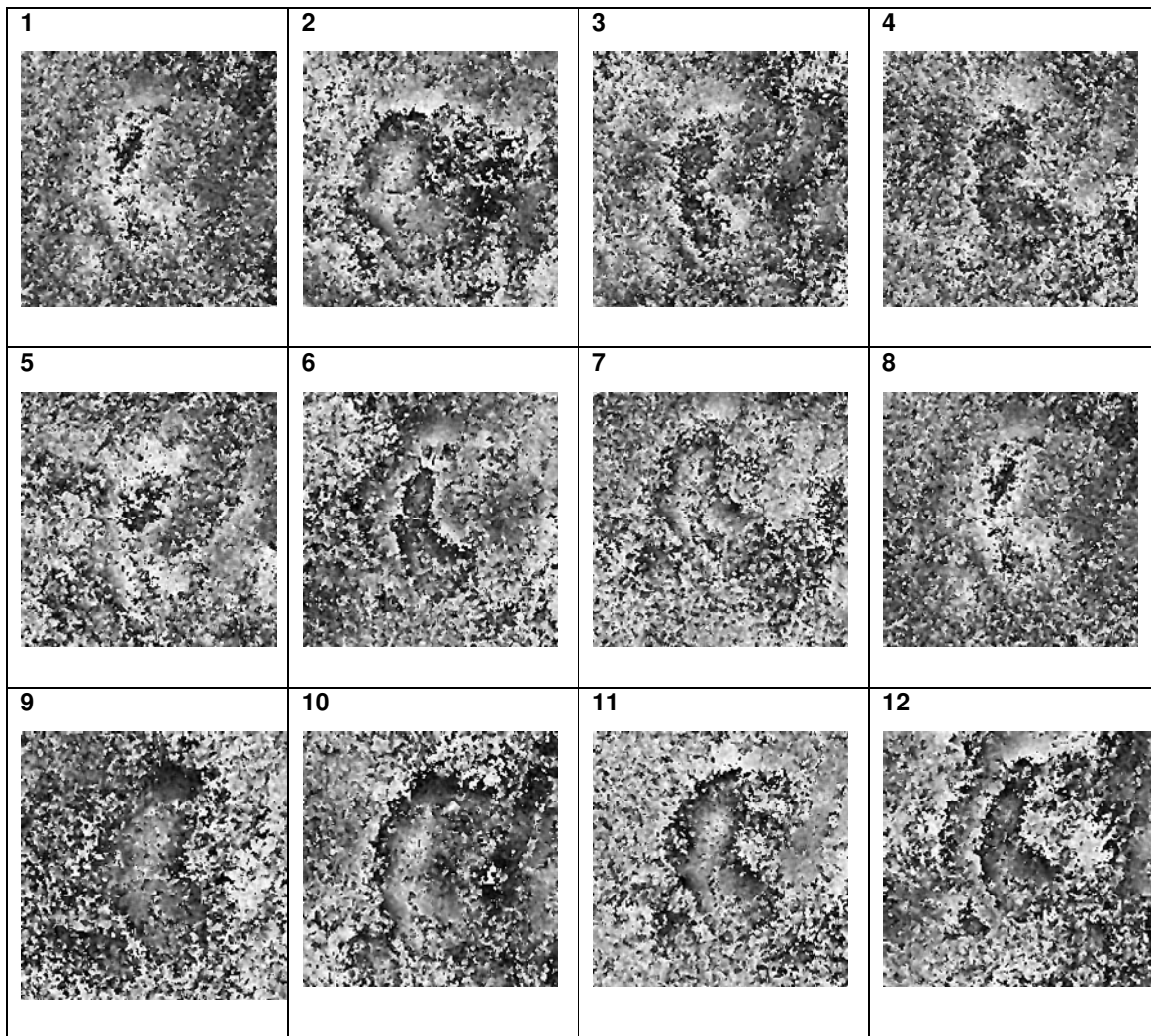


Figura 17– Interferogramas Radarsat-1 sobre Manaus, com detalhe para AMC. Os pares estão identificados pelos números correspondentes na Tabela 3.

ID	Imagem 1	Imagem 2	<i>Baseline</i> Temp (dias)	<i>Baseline</i> Perp (m)
1	20060812	20071111	456	-36,8047
2	20060929	20070409	192	-197,6499
3	20060929	20070527	240	-117,4715
4	20060929	20070714	288	-272,0721
5	20061023	20071018	360	-95,3590
6	20061023	20071205	408	-41,5777
7	20061116	20070807	264	-375,1935
8	20061116	20070924	312	-211,5787
9	20061116	20071018	336	-52,1265
10	20061116	20071205	384	8,0450
11	20061210	20071111	336	-208,7636
12	20070807	20070924	48	165,3798

Tabela 3 – Número de identificação, datas das imagens que formam o par interferométrico e valores de *baseline* temporal e perpendicular.

3.9 Desdobramento de fase e análise estatística (medida da deformação)

Como explicado anteriormente, os resultados gerados na etapa de estimativa de frequência local de franjas e confiança foram utilizados na etapa de *unwrapping*. É importante notar que neste estudo a escala de análise é localizada, procurou-se observar a feição AMC e por isso os dados tiveram que ser reduzidos em alcance e azimute algumas vezes anteriormente ao desdobramento dos valores de fase. A Figura 18 apresenta os resultados do *unwrapping*.

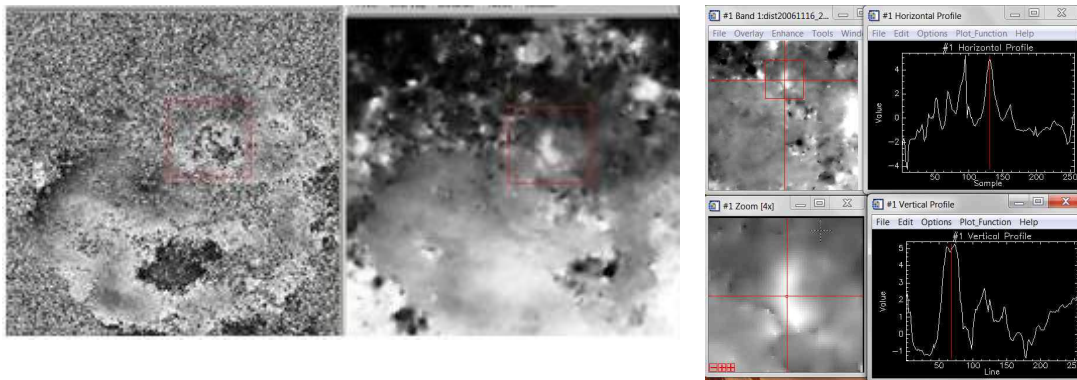


Figura 18– A esquerda interferogramas antes e depois do desdobramento de fase. A direita o histograma da feição AMC nos eixos x e y.

A análise estatística consistiu na análise de duas regiões denominadas de ROI 1 e ROI 2, respectivamente, AMC e sua área de entorno onde se assumiu que não existe deformação de terreno. Para a determinação da ROI 2 foi considerado o conhecimento geológico-geomorfológico estudado em Ramos (2009). A Figura 19 apresenta a localização das áreas sobre o interferograma final.

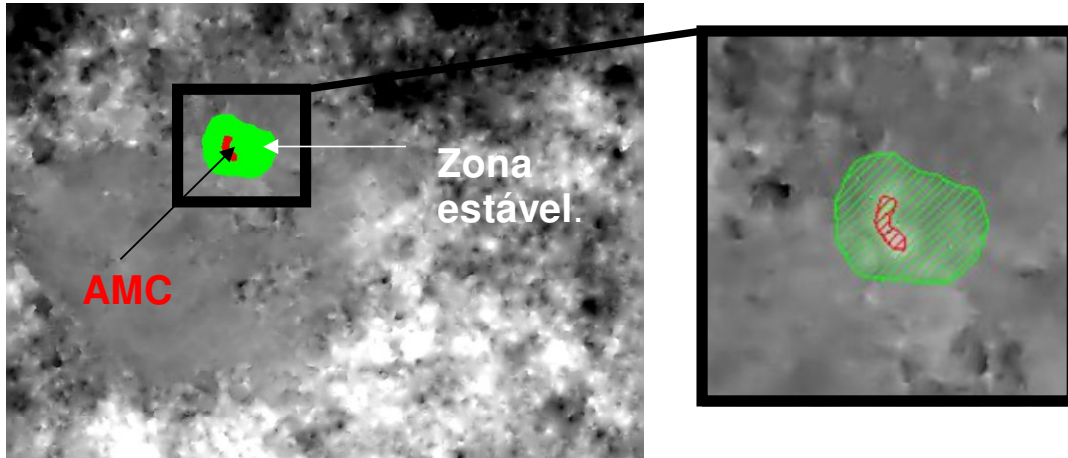


Figura 19– Localização das ROIs 1 e 2 sobre o interferograma final. A área em vermelho representa a AMC e a área em verde a zona estável de referência.

Foram calculados a média, desvio padrão e valores mínimos e máximos para as duas áreas em radianos. Em seguida computou-se a diferença entre o valor máximo de ROI1 e a média de ROI2 para derivar a diferença de fase, considerando a não deformação de ROI2. Desta forma, obteve-se os valores de fase interferométrica final em radianos para os 20 pares analisados. Posteriormente, os valores em radianos (fase) foram convertidos para cm no sentido de quantificar a deformação do terreno. A Tabela 4 apresenta o resultado final para os 20 pares analisados.

Imagem 1	Imagem 2	Max (ROI1)	Média (ROI2)	DP	Deformação radianos	cm	AMC
20060812	20061210	-0.49	-4.19	2.61	3.70	1.65	não
20060812	20071111	2.46	-6.75	1.92	9.21	4.11	sim
20060929	20070409	9.34	4.84	1.41	4.50	2.01	sim
20060929	20070527	7.08	2.44	1.31	4.64	2.07	sim
20060929	20070714	7.00	0.74	2.9	6.26	2.79	sim
20061023	20061116	-2.84	-2.98	2.19	0.14	0.06	não
20061023	20071018	-1.97	-2.07	2.5	7.02	2.70	sim
20061023	20071205	1.53	-5.41	2.22	6.94	3.09	sim
20061116	20070807	8.47	2.12	1.81	6.35	2.83	sim
20061116	20070924	12.17	6.73	1.63	5.44	2.43	sim
20061116	20071018	0.49	-4.86	2.72	5.35	2.39	sim
20061116	20071205	5.54	-0.88	1.64	6.42	2.86	sim
20061210	20071111	6.59	-0.73	1.68	7.32	3.26	sim
20070409	20070527	6.16	4.78	0.86	1.38	0.62	não
20070409	20070714	-1.25	-2.86	1.33	1.61	0.72	não
20070527	20070714	2.12	1.3	1.43	1.61	0.72	não
20070807	20070924	3.26	2.19	1.83	1.07	0.48	sim
20070924	20071018	-6.21	-6.37	2.04	0.16	0.07	não

Tabela 4– Data das imagens do par interferométrico, valor máximo de ROI1 e média de ROI2, DP (desvio padrão), fase interferométrica final em radianos e cm. Presença ou não da feição AMC.

Os valores de desvio padrão da fase interferométrica para cada par pode ser considerado como o grau de incerteza das medições. A média ds valores de ROI 2 representa a referência na superfície. Os valores de deformação são relativos a esta referência. A conversão entre os valores em radianos para cm é realizada a partir da relação : $\frac{\text{radianos}}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2}$

$$\frac{\text{radianos}}{2\pi} \times \frac{\lambda}{2}$$

3.10 Discussão Final e Perspectivas

Como já observado anteriormente, os pares selecionados que apresentam a AMC compõem um conjunto de 12 interferogramas com datas independentes, logo, considera-se improvável que um evento de origem atmosférica se repita em pelo menos 13 datas diferentes obedecendo a mesma extensão e exata localização. A **Error! Not a valid bookmark self-reference.** apresenta o gráfico que mostra os 12 pares interferométricos coloridos de acordo com a legenda de medida de deformação (em cm). Os valores de *baseline* perpendicular (eixo y) e as datas das imagens que formam os pares (eixo x) são representados pelo quadrado azul.

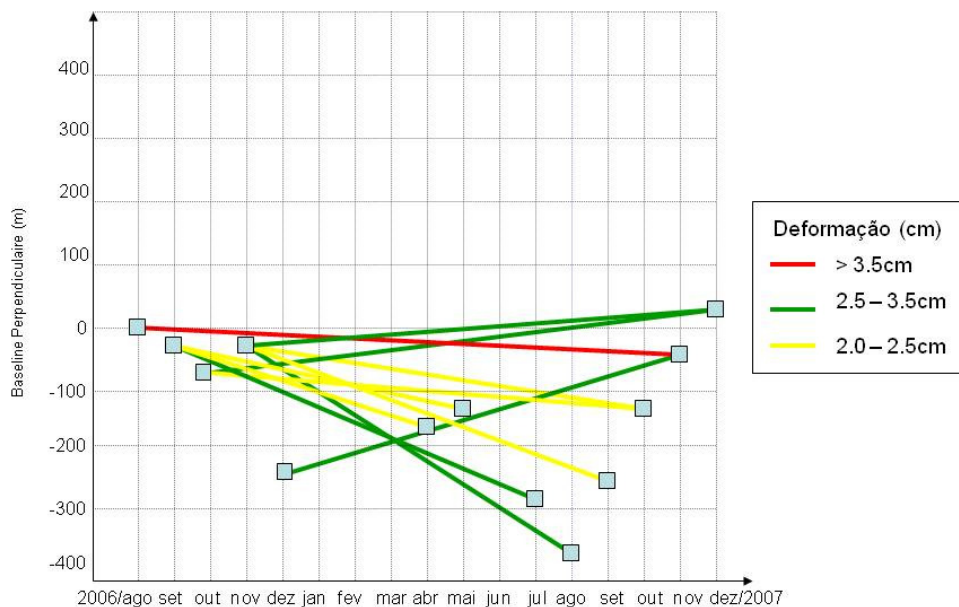


Figura 20 – Valores de deformação para os interferogramas Radarsat-1 de Manaus.

De acordo com o gráfico acima, é possível notar que se trata de um movimento lento e gradual da área de possível deformação crustal, onde o par de maior *baseline* temporal (agosto de 2006 e novembro de 2007) apresenta o maior valor de deformação de terreno (4,11cm).

4 Análise PTI (*Point Target InSAR*) aplicada sobre os dados Radarsat-2 : Abordagem *Dual-Scale Network* e resultados

O objetivo deste capítulo é introduzir os conceitos de PTInSAR (Interferometria *Point Target*) e descrever a análise *Dual-Scale Network* que é baseada no método *Dual-Scale PSI* publicada por Rabus e Ghuman (2009).

A cadeia de processamento chamado Análise *Dual-Scale Network* foi desenvolvida pela empresa canadense 3vGeomatics que permitiu sua aplicação para o conjunto de 24 imagens do satélite Radarsat-2, obtidos entre 2008 e 2010 com o objetivo de medir a existência de uma zona de movimento crustal na cidade de Manaus, conforme identificado no estudo anterior, utilizando a técnica DInSAR sobre os dados Radarsat-1.

4.1 Identificação de alvos pontuais estáveis (*Point Targets*) em imagens SAR

Na tecnologia InSAR, o monitoramento de um determinado alvo no solo depende da estabilidade de reflexão dos alvos, em pelo menos duas aquisições de imagens de satélite. Portanto, InSAR baseia-se na identificação de alvos com um sinal estável ao longo do tempo. Os tipos de alvos podem ser agrupados em diferentes categorias, como se segue:

Point Target (PT) ou alvo pontual é um pixel da imagem SAR dominado por um único objeto único qui compreende individualmente o sinal de retorno. O PTs são ideais para o monitoramento contínuo com precisão milimétrica. Alvos pontuais são facilmente encontrados em ambientes urbanos.

Distributed Target (DT) ou alvo distribuído é um pixel da imagem SAR que não é dominado por um único objeto, mas contém muitos sub-objetos que contribuem coletivamente no sinal que retorna ao sensor. O alvo distribuído representa uma composição dos sinais de seus sub-objetos. Geralmente, apresentam comportamento menos estável entre as diferentes aquisições, em função

da mudança de sua posição relativa além da mudança de resposta ao longo do tempo. A variação de *baseline* perpendicular irá induzir uma menor correlação entre os sinais neste caso.

O DT pode também ser usado para as medições do tempo de deslocamento contínuo do solo, mas com um erro maior do que a de PT. Em contrapartida, a densidade de DTs no terreno natural é muito maior do que PTs.

Seasonal Target (ST) ou alvo sazonal é definido como um PT ou DT que apresenta

estabilidade periódica ou intermitente. Por exemplo, uma estrutura metálica pode ser exposta durante os meses de verão, mas obscurecida pela neve durante o inverno. O movimento de terreno verificado no caso de STs pode ser caracterizado por cada período consecutivo que eles são estáveis. Devido a instabilidade geral de STs, a sua precisão é menor do que a de DTs. A maioria dos métodos InSAR ignora os STs, porque não são estáveis de forma contínua ao longo do tempo.

Muitos métodos têm sido desenvolvidos para identificar alvos pontuais em séries de imagens SAR, os principais métodos disponíveis são:

1. **Mean Sigma Ratio (MSR)** (Werner, Wegmuller et al 2003) - Pixels PTs possuem quantidade de ruído bem menor que o associado aos DTs, uma vez que a difusão de um PT é devido a um único alvo localizado que é dominante na sua célula de resolução. A intensidade de retroespalhamento a partir de um PT permanece praticamente inalterado quando observado sob ângulos de incidência ligeiramente diferentes. Inversamente, a dispersão de uma DT flutua muito devido a estas pequenas mudanças no ângulo de incidência ao longo do tempo. Portanto, os PTs são DTs distinguíveis, quando considerados os valores de sua dispersão de baixa amplitude, ou seja, um baixo desvio padrão de retroespalhamento relativo ao retroespalhamento médio. Esta técnica é apropriada para identificar candidatos a PTs em grandes (≥ 30 aquisições) séries de imagens, mas funciona mal para conjuntos de dados menores. Além disso, a técnica MSR é bem adequada para identificar os PTs correspondentes às estruturas artificiais brilhantes, mas não tem sucesso com alvos de SNR (*signal-noise-to-ratio*) baixo que ainda pode ter valores de fase estável.

2. Diversidade espectral (Scheiber e Moreira 2000): Como a intensidade e a fase de um pixel PT é diretamente dependente da RCS (*Radar cross section*) e da localização do alvo dominante, a intensidade do retroespalhamento é quase constante quando obtidos diferentes looks. Por conseguinte, os pixels com baixa diversidade espectral podem ser identificados numa única imagem SAR. Além disso, a diversidade espectral das imagens registadas SAR podem ser combinados para identificar os pixels que ainda têm baixa diversidade espectral ao longo do tempo. Esta técnica identifica com sucesso o PTs com as características inerentes de alvos pontuais, mesmo em relativamente pequenas séries de imagens SAR (≥ 12 aquisições). Ao contrário do MSR, esta técnica é menos tendenciosa em relação ao alto retroespalhamento de PTs como estruturas urbanas, além de identificar pixels escuros que são dominados por um único alvo.

3. Estabilidade de fase (Hooper, Zebker et al. 2004) : Como se espera que a fase dos PTs seja estável ao longo do tempo, a estabilidade de fase fornece um critério natural para identificação de candidatos à PTs. Os interferogramas são formados a partir de uma série de imagens SAR co-registradas, e a fase topográfica é estimada e eliminada com a ajuda de um MDE externo. A fase residual é modelada como uma superposição de contribuições de fase em razão da deformação do terreno, da incertitude da órbita, de efeitos atmosféricos, de erros do MDE e do ruído. Cada contribuição de fase, com exceção do ruído, é modelada e retirada a partir da utilização de estatísticas espaço-temporais particulares que correspondem à correlação espacial, à dependência da baseline perpendicular ou da coerência temporal. Enfim, o termo de ruído pode ser estimado e os pixels são selecionados quando o ruído de fase é suficientemente pequeno.

Este algoritmo utiliza inicialmente o MSR para identificar os candidatos à PTs e rejeita de maneira interativa os PTs que contém o maior nível de ruído. A estabilidade defase é bem adaptada à identificação de PTs pois o objetivo da técnica PTI é de monitorar de forma confiável a deformação de terreno gradual. A confiabilidade da técnica PTI depende do sucesso da identificação de pixels com pouco ruído de fase.

4.2 Conceitos e etapas da análise em *Dual-Scale Network*

A abordagem denominada *Dual-Scale Network* tem o objetivo a descontaminação interativa da fase, isolando e retirando as contribuições que influenciam a medição precisa de zonas de deformação de terreno.

As etapas de tratamento aplicadas sobre os dados do satélite Radarsat-2 podem ser compreendidas a partir da exploração de uma rede volumosa de dados (*Network InSAR*) bem conectadas e precisamente corrigidas e referenciadas (*2D stack processing*) que permitem a detecção e interpretação do sinal de deformação sob diferentes escalas espaciais para a obtenção de séries temporais históricas relativas ao movimento do terreno. Nesta seção, serão apresentados os princípios da metodologia, além das etapas do processamento e resultados.

4.2.1 Rede InSAR (*Network InSAR*)

A exemplo de outras abordagens SBAS (*Small Baseline Subset*) (Berardino, Fornaro et al. 2002) (Hooper 2008), a técnica de rede (*network*) InSAR é baseada na geração de todos os interferogramas viáveis, que são tratados independentemente e depois invertidos, de maneira a colaborar com a atenuação do ruído e a maximização da relação *signal-to-noise-ratio* (SNR). A Figura 21 ilustra o esquema de rede para o conjunto de dados InSAR de Manaus, onde os polígonos em cinza representam as imagens de radar e os arcos coloridos representam os interferogramas segundo seus respectivos valores de coerência.

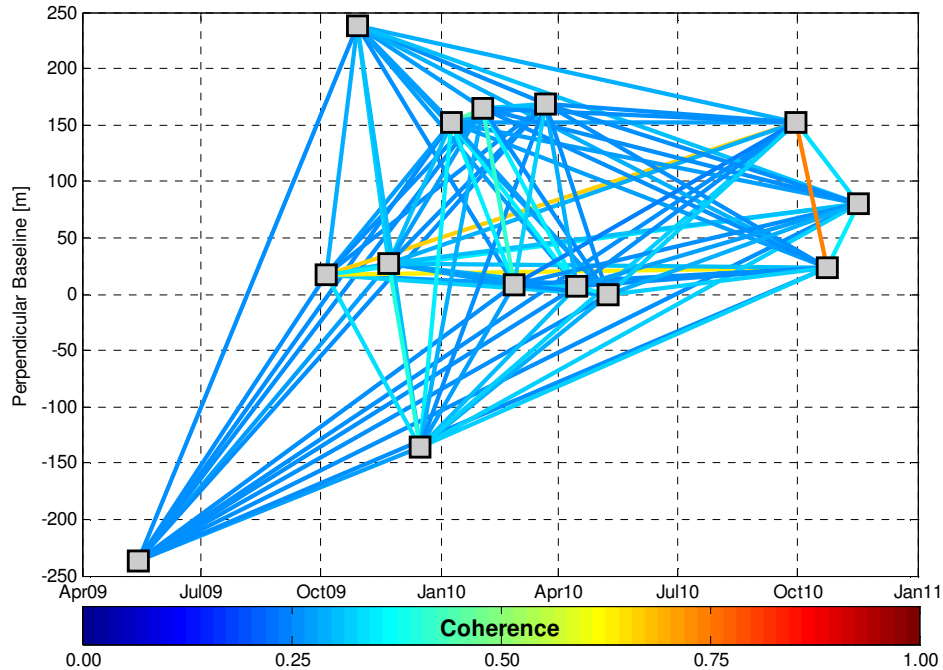


Figura 21 - Exemplo de diagrama de rede InSAR para a série de imagens Radarsat- 2 de Manaus.

A formação de todos os interferogramas possíveis aumenta consideravelmente o número de possibilidades para se obter dados coerentes. Além disso, os interferogramas de maior coerência podem ser privilegiados a partir de ponderação mais favorável durante a inversão. Quando se utiliza todos os pares possíveis, existe uma melhora considerável de SNR do sinal relativo à deformação do terreno. A rede InSAR se beneficia igualmente da descontaminação de fase, uma vez que a melhora da decomposição estatística da fase é possível após o aumento da qualidade dos valores de fase. O refinamento das informações orbitais é igualmente otimizada pois diferentes correções de *baseline* podem ser combinadas para se obter a informação real das órbitas.

4.2.2 Análise *Dual-Scale Network*

As técnicas tradicionais de abordagem PTI exigem um volume elevado (Les ~ 30 aquisições) de imagens SAR, e também uma modelagem (linear, não-linear, sinlinéaire, non-linéaire, sinusoidal etc) para separar as três principais contribuições de fase : efeitos atmosféricos, erro de altimetria (ou erro do MDE), e o movimento do terreno (Werner, 2003). Desta forma, tais contribuições podem ser difíceis de serem automatizadas, estando sujeitas a erros de operados e influenciadas por um modelo de fase hipotético. Como já indicado, as etapas do processamento *Dual-Scale Network InSAR* é baseado no método *Dual – Scale PSI* publicado por Rabus et Ghuman, 2009. As técnicas de rede

InSAR foram integradas ao *Dual-Scale PSI* para caracterizar os movimentos de terreno com menos ruído e maior confiabilidade estatística.

Praticamente, se utiliza a informação diferencial produzida pela etapa de processamento « 2D *stacking* » para a aplicação da análise em escala de alta resolução ou pontual (*Point Target*) para identificar com sucesso a deformação do terreno.

Desta forma, os PTs são analisados para se obter maior detalhe espacial. A descontaminação de fase e a redução do ruído são aplicadas de maneira interativa por três vezes ao mesmo tempo em que a resolução aumenta, com objetivo de mapear com precisão a evolução espacial e temporal da deformação do terreno. Um resumo da metodologia utilizada é apresentada na Figura 22. Cada etapa é detalhada nas seções a seguir.

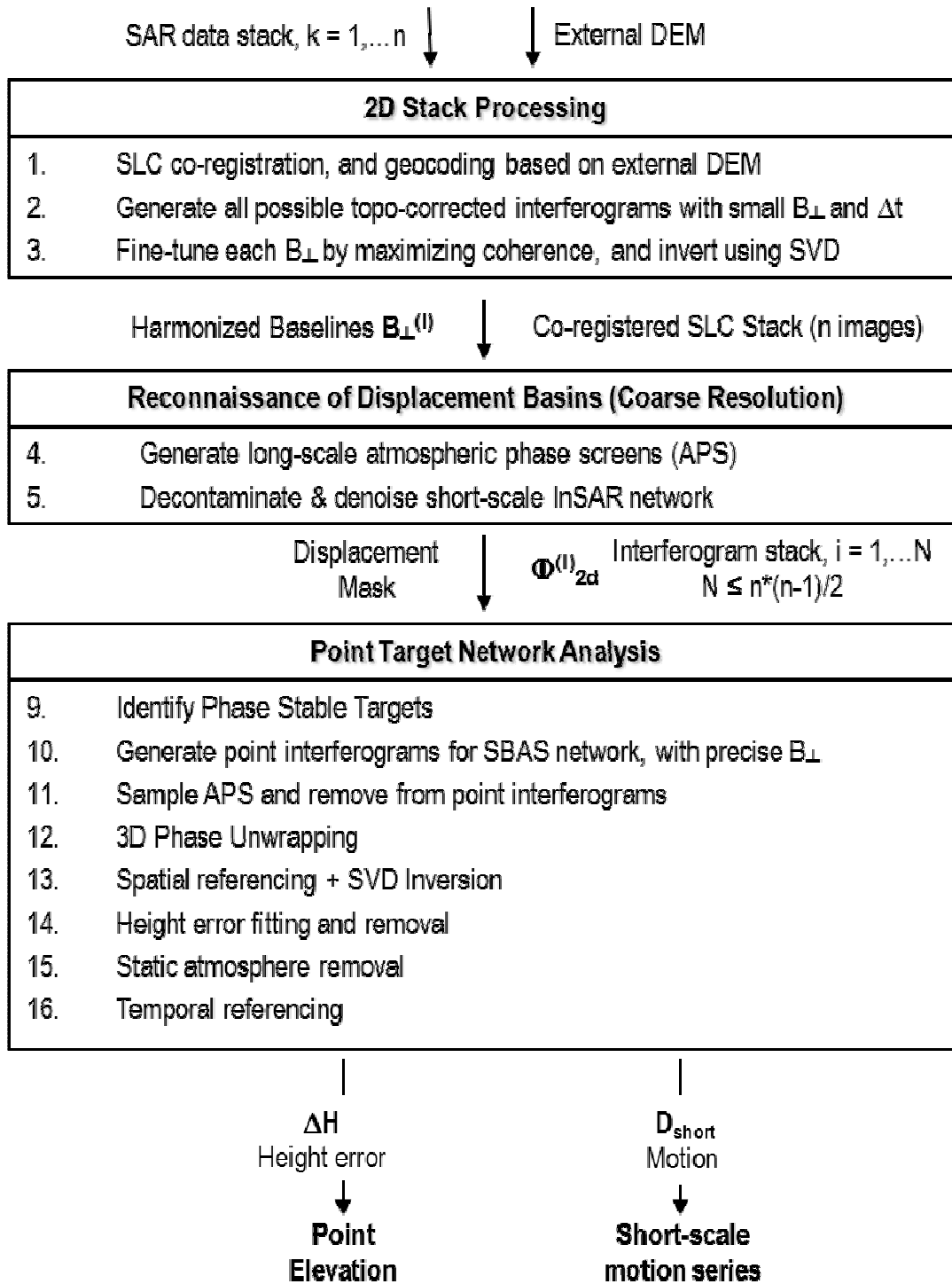


Figura 22 – Fluxograma do processamento *Dual-scale PSI Network*.

4.2.3 Processamento 2D Stack

Após o tratamento dos dados originais SAR e o co-registro das imagens, a fase interferométrica é avaliada em todas as combinações de pares em baixa resolução. Os interferogramas que apresentam baixa correlação temporal ou espectral significativa são eliminados. Cada interferograma tem sua topografia corrigida com a ajuda de um MDE externo, e as *baselines* geométricas são refinadas a partir da abordagem de maximização da coerência. A rede de *baselines* é corrigida e harmonizada a partir do método SVD (*Singular Value Decomposition*) para a geração de órbitas precisas para cada cena.

4.2.4 Reconhecimento de zonas de deformação

Os efeitos atmosféricos de grande escala são representados pelas APS (*Atmospheric Phase Screen*), que são geradas e suprimidas de cada interferograma. Cada par InSAR é filtrado espectralmente e desdobrado espacialmente. A rede de interferogramas desdobrados é invertida de forma a dar origem a um interferograma de ruído reduzido representativo de cada data. As contribuições relativas aos efeitos atmosféricos, erro de altimetria, e atmosfera de menor escala são modelados e extraídos. Todas as zonas de deformação são selecionadas e mascaradas para receber um tratamento especial nas demais etapas. Dados de terreno podem ser igualmente utilizados como entrada para a identificação de zonas de deformação.

4.2.5 Análise *Point Target Network*

A última etapa consiste na identificação de PTs dentro da base de dados considerando sua diversidade espectral e a estabilidade temporal de fase. Logo, a rede de interferogramas pontuais é gerada. Cada PT de um interferograma é modelado a partir das informações já geradas em outra escala tais como : efeitos atmosféricos (APS), topografia e deformação do terreno. A rede pontual de fase residual é espacialmente desdobrada e invertida a partir do algoritmo SVD. A atmosférica estática (relativa à altitude), o erro de altimetria e a atmosfera de curta escala são organizados de maneira a eliminar as origens de contaminação residual. Os históricos de fase final são referenciados espacialmente a um conjunto de pontos em áreas exteriores às zonas de deformação de terreno (zonas consideradas estáveis), e temporalmente referenciados à primeira cena da série.

Para resumir, é possível dizer que as contribuições de fase são modeladas de maneira interativa e retiradas em resoluções espaciais cada vez maiores, resultando em cartas de deformação de máxima resolução. O *multilooking* dos interferogramas diminui o ruído a partir da média dos valores espaciais, o que beneficia os algoritmos sensíveis ao ruído como o desdobramento de fase assim

como a modelagem estatística das diferentes contribuições. Uma vez que um modelo grosseiro é obtido para cada tipo de contribuição de fase, o ruído suplementar pode ser introduzido durante a passagem a uma resolução mais elevada. Portanto, a cada etapa, o aumento do ruído é compensado pela otimização da qualidade dos modelos de contribuição de fase, o que conduz a decomposição progressiva dos resíduos de fase, que são desdobrados e remodelados de maneira confiável.

É possível ainda incorporar as interações suplementares em resoluções intermediárias, mas nossa experiência mostra que uma solução convergente é obtida a partir das três grandes etapas presentes na Figura 22.

Finalmente, os PTs são geocodificados e os históricos de valores de fase correspondentes são convertidos em deformação ao longo da linha de visada do satélite (LOS – *Line of Sight*). A série temporal de deformação LOS é projetada na direção geotécnica própria e é exportada para visualização e interpretação geofísica. A interpretação e determinação da direção do movimento é geralmente um processo de colaboração entre os especialistas da área. No presente estudo, os resultados InSAR são integrados à expertise geológica. A análise *Dual-scale* PTI foi aplicada com sucesso para o cálculo da deformação de superfície da zona urbana de Manaus como será visto na etapa de resultados.

4.2.6 Desdobramento de fase em 3D

Após o desdobramento de fase, os interferogramas são invertidos para a produção dos resultados finais. Desta forma, o desdobramento de fase pode ser considerado como uma etapa chave do conjunto do processo, pois todo o erro introduzido neste momento será diretamente transmitido à medida final.

Para o tratamento de séries temporais InSAR, o desdobramento de fase pode ser entendido como um problema 3D (a terceira dimensão representa o tempo) em oposição à uma série independente de problemas 2D, o que conduz à otimização da precisão e da solução de maneira similar à forma que o desdobramento 2D oferece vantagens em relação aos métodos 1D (Hooper and Zebker 2007).

Os algoritmos de desdobramento de fase desenvolvidos para os conjuntos de dados 3D são geralmente baseados na hipótese de que a diferença de fase entre pontos de amostragem vizinhos em qualquer dimensão é geralmente inferior à metade de um ciclo de fase (Huntley 2001). Porém, no caso de séries temporais InSAR, geralmente este não é o caso da dimensão temporal. É principalmente em razão das diferenças de atraso atmosférico que variam geralmente mais que um

meio ciclo de fase dentro de uma imagem (Hooper and Zebker 2007). A deformação também pode conduzir à saltos superiores a meio ciclo de fase.

Aqui, nós consideramos o fato de que a diferença de fase entre pontos de amostragem vizinhos é suscetível à variação menor que meio ciclo entre as aquisições subsequentes, pois a contribuição de sinais espacialmente correlacionados entre pontos próximos espacialmente geralmente é fraca. Nós nos referimos à esta diferença de fase como um gradiente de fase. O problema de desdobramento de fase 3D é entendido como uma série de estimativa 2D de máxima probabilidade *a posteriori* (MAP) com funções de densidade de probabilidade (PDF) *a posteriori* estimadas a partir da utilização de uma terceira dimensão, representada pelo tempo.

A probabilidade *a posteriori* para cada gradiente de fase desdobrada em casa interferograma é estimada como o produto da função de verossemelhança para a fase desdobrada, levando em consideração o valor dobrado, e uma probabilidade *a priori* para o gradiente de fase desdobrada (regra de Bayes). Um programa de otimização é utilizado em seguida para investigar a solução que maximiza a probabilidade *a posteriori* para cada interferograma.

4.3 Resultados

O objetivo desta seção é de apresentar os resultados obtidos no processamento apresentado na Figura 22: processamento *2D Stack*, detecção de zonas de deformação e análise de *Point Target* descritos acima.

Os resultados de Manaus foram gerados a partir de uma série de 24 imagens *Fine images* do satélite RADARSAT-2. Com a interferência de cada imagem sobre foi possível gerar um total de 244 interferogramas onde os pares excessivamente não correlacionados foram ignorados. Isto representa aproximadamente 12 medidas independentes para cada data (tradicionalmente apenas 1 medida por data é utilizada). A volumosa rede InSAR foi invertida simultaneamente para obter o histórico de movimentos do solo em cada alvo. Uma comparação visual por data permite observar a redução significativa do ruído obtida pela exploração estatística da redundância inerente à rede InSAR.

A

Figura 23 ilustra o mapa de deformação acumulada gerado para a cidade de Manaus. A principal zona de deformação foi identificada, confirmando os resultados preliminares obtidos na análise dos dados Radarsat-1.

As seções seguintes apresentam os resultados intermediários gerados em etapas diferentes mas que contribuem à precisão e fidelidade dos resultados finais.

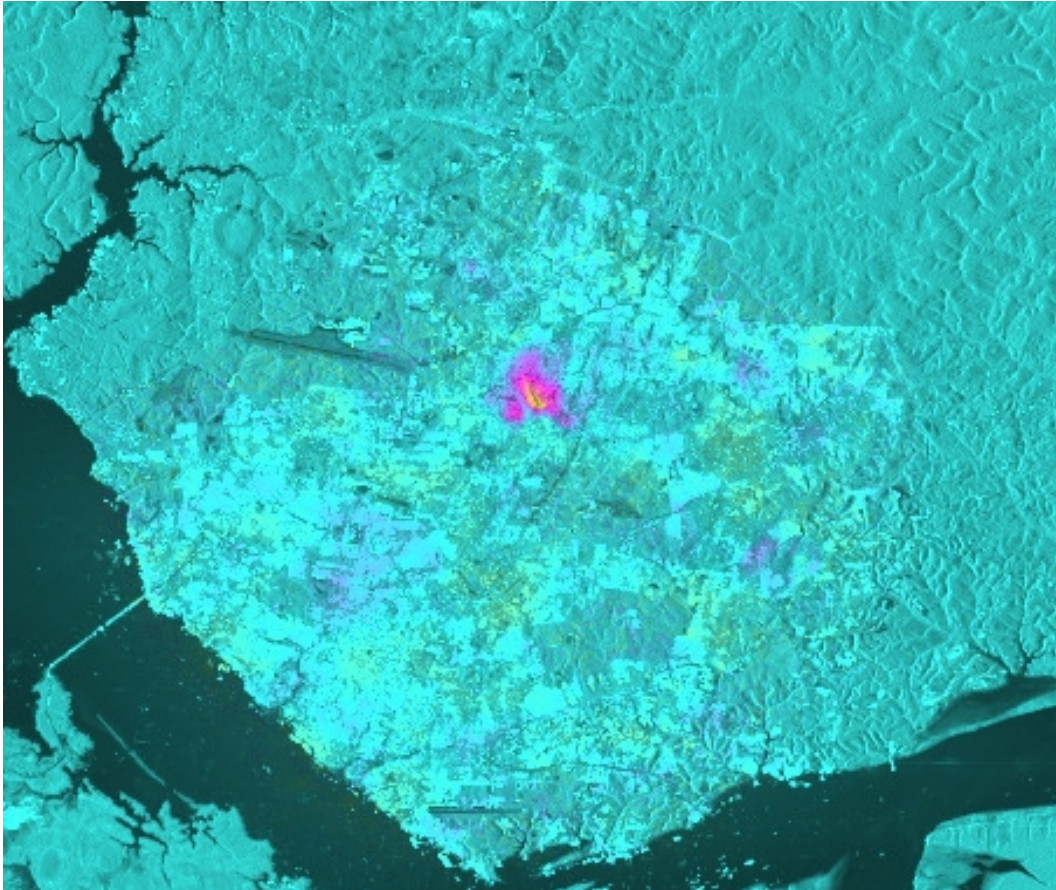


Figura 23 - Imagem da deformação cumulativa sobre a área urbana de Manaus.

4.3.1 Dados originais, registro et geocodificação

Para esta etapa, foram utilizadas 24 imagens do satélite Radarsat-2 no formato *Single Look Complex* que cobrem a região de Manaus o Modelo Digital de Elevação SRTM correspondente à mesma região. As informações de órbitas precisas para as imagens SLCs foram obtidas a partir do site da empresa MDA.

A primeira etapa do tratamento consiste em registrar as imagens e malta resolução, preparando-as para as diferentes etapas do tratamento. Como as imagens SLC não possuem exatamente o mesmo tamanho, os offsets são estimados e um polnômio é utilizado para registrar as imagens escravas à

uma imagem mestre escolhida no meio da série temporal. Para o conjunto de dados de Manaus, a imagem adquirida em 15 de julho de 2009 foi selecionada como mestre.

Este passo é baseado em técnicas de correlação bem estabelecidas no domínio de sensoriamento remoto por radar. A Figura 24 apresenta a intensidade média de todas as imagens SLC registradas em geometria RDC (*Range Doppler Coordinates*). As linhas pretas na borda direita representam áreas onde os dados são nulos, em função da diferença de localização das mesmas.

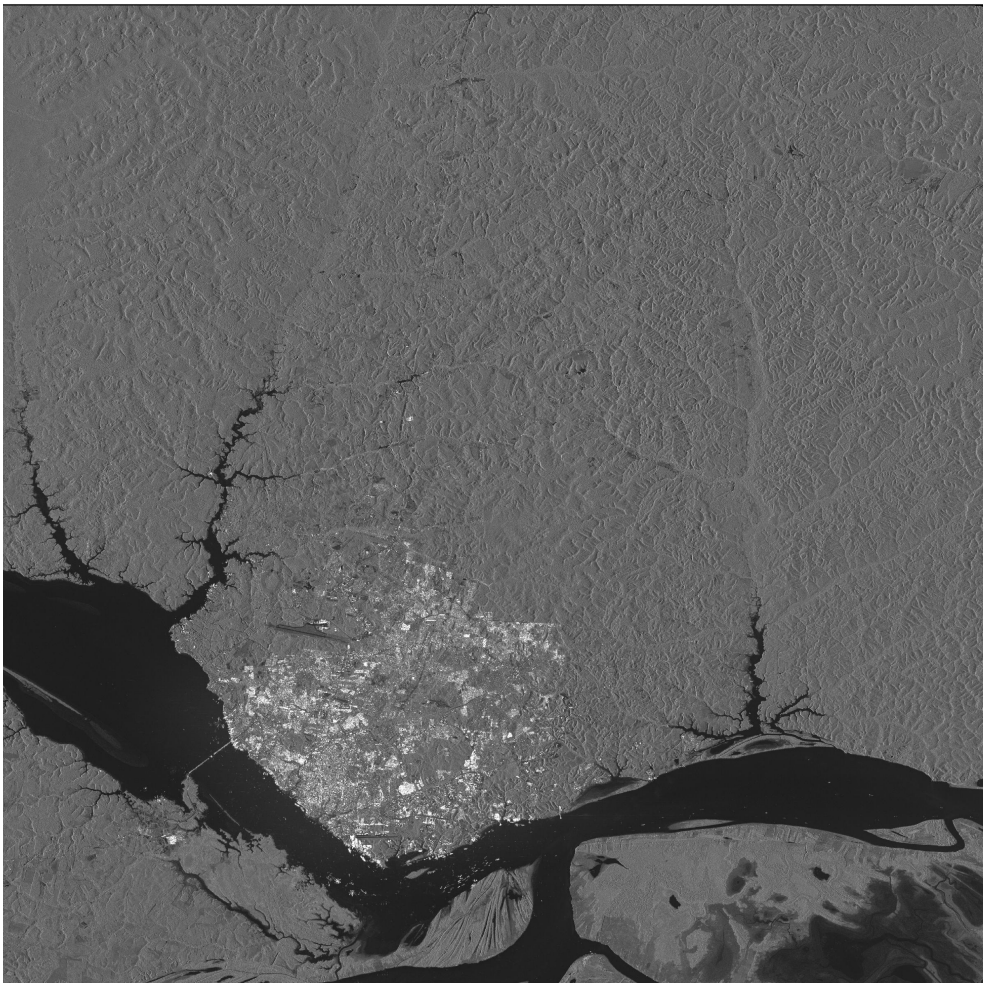
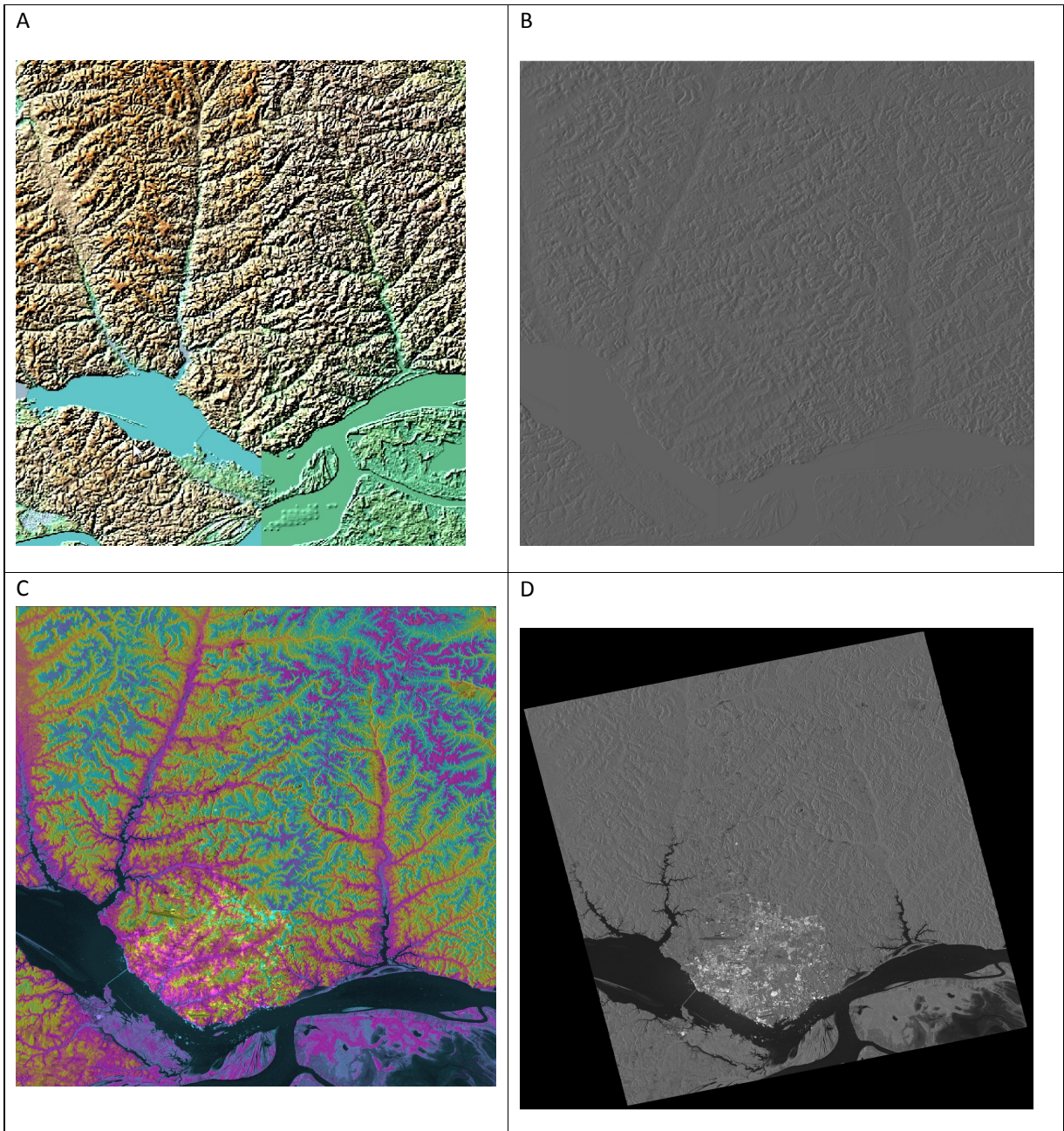


Figura 24– Amplitude média obtida a partir de todas as imagens SLC registradas em geometria RDC.

Para a etapa de geocodificação, o MDE foi convertido em geometria RDC e registrado a partir da imagem de amplitude média.

A Figura 25 apresenta as principais etapas do tratamento do MDE. Em A, o MDE SRTM original; Em B, os dados foram reamostrados em geometria RDC; A Figura 25 C apresenta o MDE colorido em escala de 100 metros por franja, análogo às curvas de nível. Em D, o objetivo principal é descrever a transição entre a geometria de terreno e a geometria RDC qui pode ser utilizada durante o processamento para a geração de mapas finais, por exemplo. A imagem D representa a amplitude média em coordenadas geográficas.



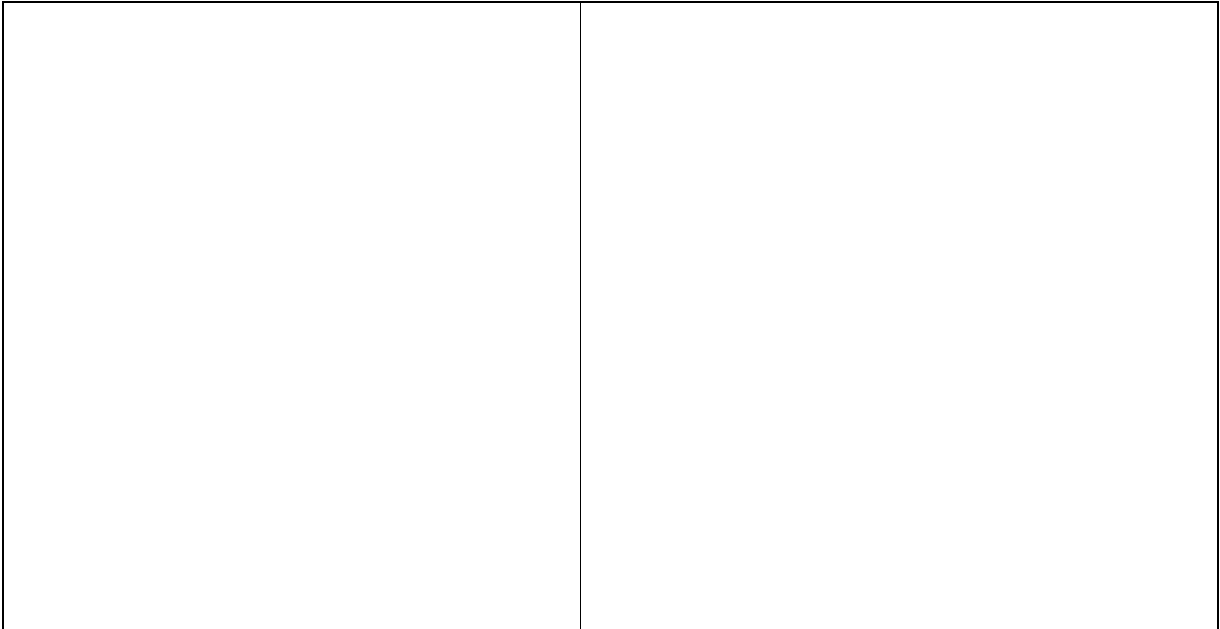


Figura 25 –Transformação do MDE em geometria radar e amplitude média em geometria de terreno.

4.3.2 Correção de *baseline* geométrica

A distância entre as posições do satélite Radarsat-2 no momento da aquisição do par é conhecida simplesmente como *baseline* ou linha de base e sua componente perpendicular à visada do satélite condiciona a sensibilidade à altimetria dos interferogramas. Ainda que as linhas de base estabelecidas a partir de informações de órbita precisas sejam exatas segundo as normas modernas, elas não são ótimas para o estudo de deformação do terreno utilizando a tecnologia InSAR. Como dito anteriormente, a partir da série de 24 imagens, 244 pares interferométricos foram gerados. A contribuição topográfica é calculada e extraída com a ajuda do MDE externo e os valores de fase são desdobrados após uma filtragem espectral forte. A fase desdobrada é espacialmente amostrada e as tendências de fase de longa escala são invertidas para corrigir as componentes da linha de base. A Figura 26 apresenta os mesmos interferogramas antes (à esquerda) e depois (à direita) da correção de *baseline* ; as franjas das imagens à esquerda representam a fase residual topográfica assim sendo também produto da estimativa inexata dos valores de baseline originais.

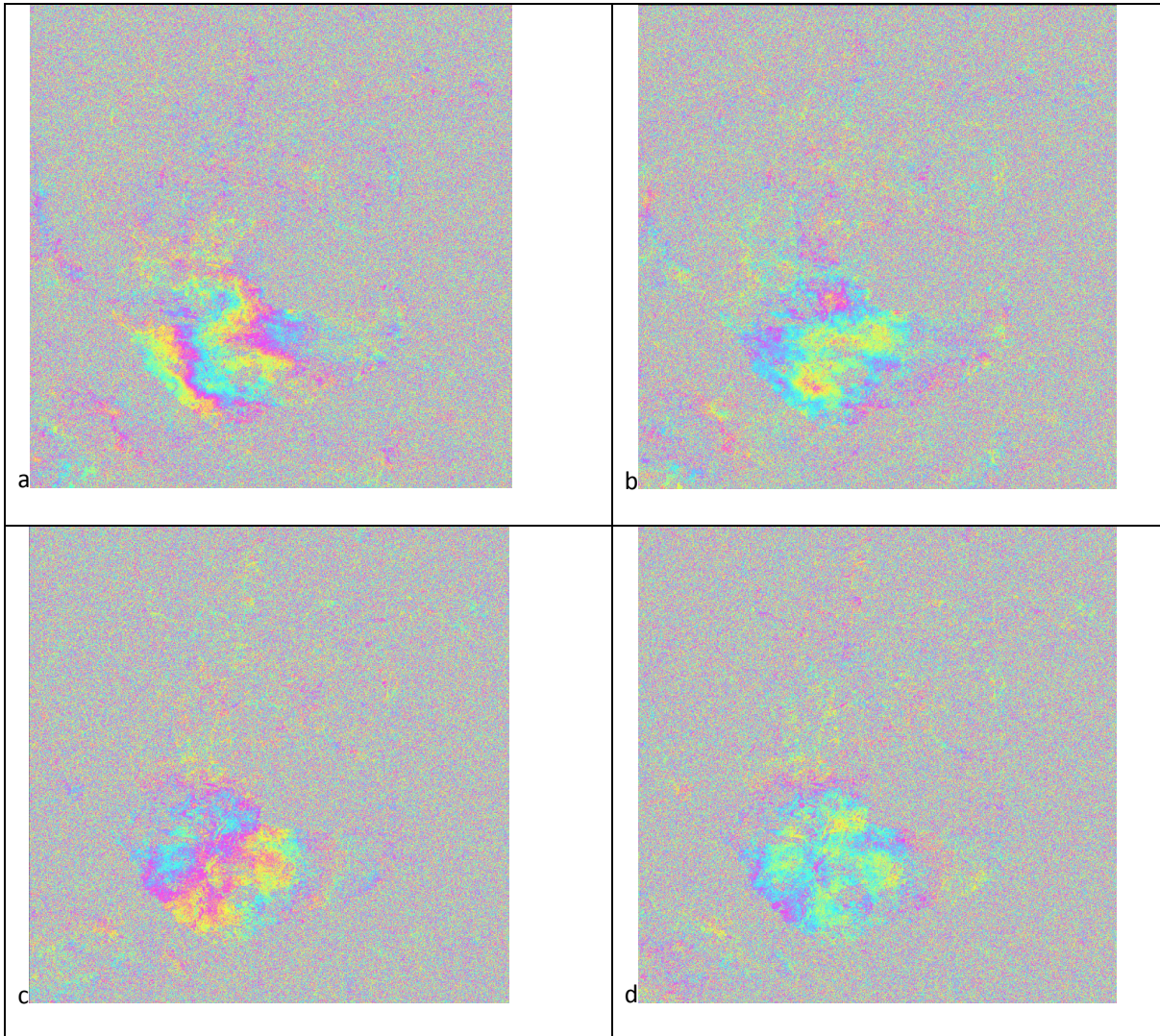


Figura 26 - (a) e (b) representam os pares 20081024 – 20111017 antes e depois da correção de *baseline*, o mesmo para (c) e (d) que representam o par 20100429-20100523.

A partir deste ponto a rede de linhas de base pode ser invertida utilizando o algoritmo de decomposição de valores singulares (SVD) que permite extrair a redundância da rede de linha de base e o cálculo de um valor único para cada cena em relação à média relativa ao tempo da rede. Esta informação é útil mais adiante quando os dados interferométricos são igualmente invertidos.

4.3.3 Subtração da fase atmosférica de longa escala

Uma das maiores contribuições de fase nos interferogramas de Manaus são causada pelo atraso não homogêneo da fase causado principalmente pelo vapor d'água presente na troposfera;

variações que se verificam geralmente em média média (2-20 km). As imagens de fase atmosférica denominadas APS neste estudo são geradas com a partir da filtragem espacial de maiores comprimentos de onda. As variações de fase relativas à curta escala são conservadas por representarem neste caso o sinal relativo à deformação do terreno. A Figura 27 apresenta um interferograma não desdobrado antes e depois da subtração da fase atmosférica de longa escala. A variação da cor de fundo (rosa/amarela e azul) é devida à subtração da constante arbitrária da fase global do interferograma. As contribuições restantes representam a atmosfera estática, o erro de altimetria e contribuições da atmosfera em pequena escala.

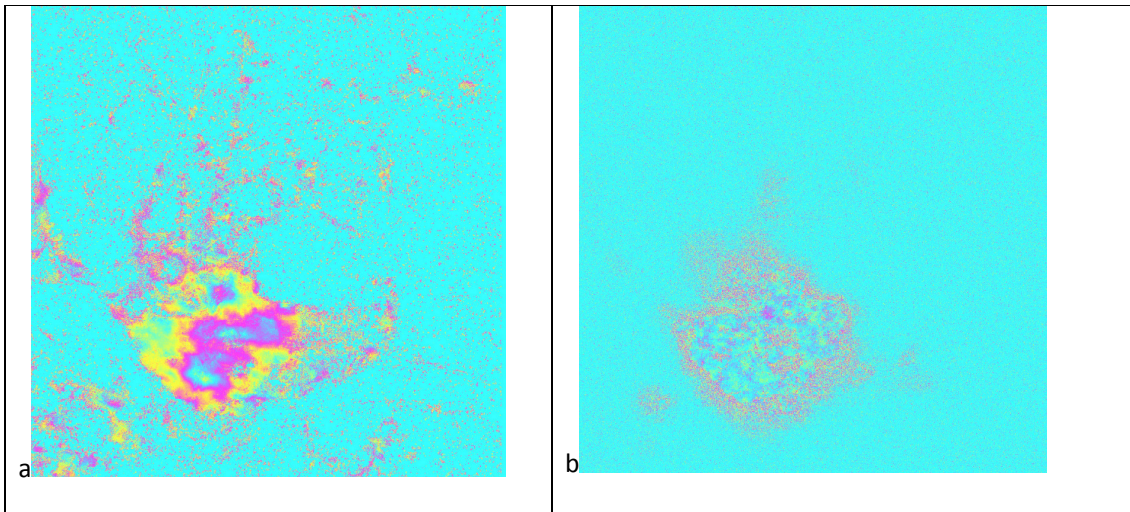


Figura 27 - Interferograma 20090317-20090405 antes e depois da subtração da fase atmosférica.

4.3.4 Inversão da rede

Inevitavelmente, e em particular em função da dinâmica sazonal existente em Manaus, a maior parte dos pares interferométricos não serão úteis para a inversão dos interferogramas. Isto se deve ao fato de que a linha de base é muito grande ou mais provavelmente em razão da perda de correlação temporal uma vez que a cobertura da superfície variou significativamente entre as datas de aquisição.

Neste contexto, os interferogramas mais úteis são selecionados a partir dos seguintes critérios : (a) Uma coerência aceitável, (b) pequena linha de base perpendicular e (c) a presença significativa do sinal relativo à deformação do terreno considerando-se o intervalo de datas maior possível (grande baseline temporal).

Para o caso de Manaus, o limite da coerência utilizado é de 0.20, a linha de base máxima selecionada é de 300m, e a baseline temporal superior a 200 dias. Adicionalmente aos critérios acima listados, é essencial que os interferogramas selecionados formem uma rede conectada às cenas SAR.

A Figura 28-a permite visualizar os 244 interferogramas possíveis representados por linhas que unem os números relativos às 24 cenas. Deste total, apenas 84 interferogramas foram selecionados visualmente e numericamente a partir do exame dos valores de coerência.

Os 19 pares ótimos de acordo com os critérios já descritos são ilustrados na Figura 28-b. As linhas que conectam as imagens SAR representam os pares suficientemente coerentes escolhidos. As cenas que não são conectadas à rede principal não podem ser temporalmente referenciadas à principal estrutura.

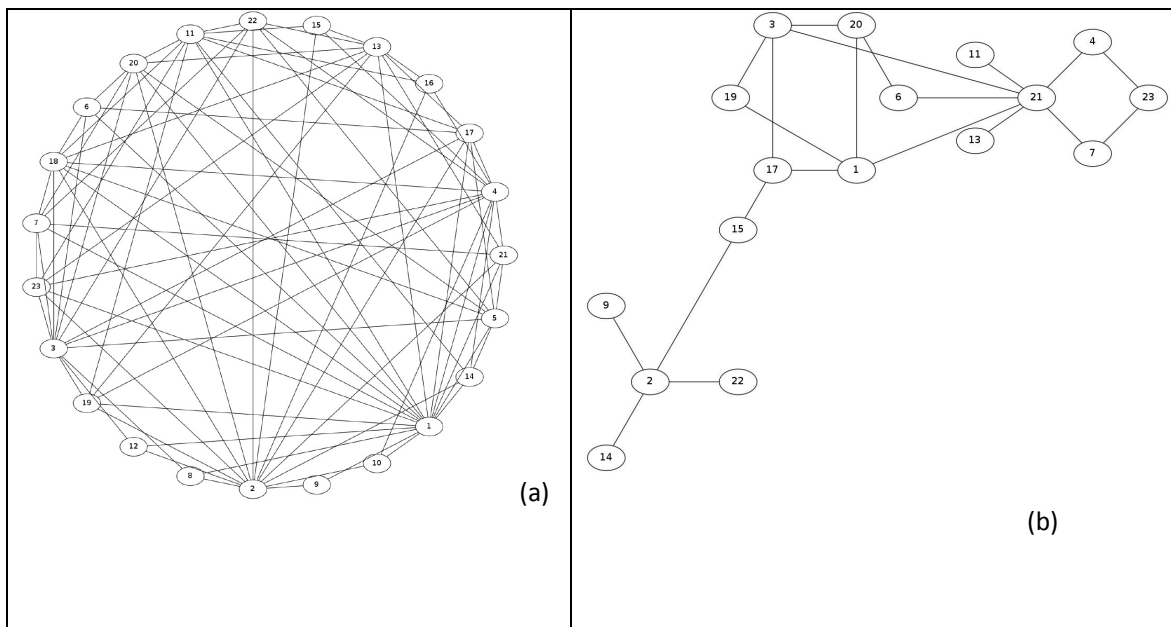


Figura 28– Rede coerente de interferogramas, (a) 244 pares ; (b) 19 pares ótimos.

A Figura 28-b apresenta a rede final invertida extraída da série de 24 imagens Radarsat-2. As cenas 5, 8, 10, 12, 16 e 18 não estão representadas pois não formam pares coerentes. Estas cenas correspondem às respectivamente às seguintes datas de aquisição : 20090128, 20090410, 20090528, 20090715, 20091019, 20091206. Neste caso, não há correlação direta entre características sazonais e coerência, pois tais imagens representam diferentes meses ao longo do ano, em diferentes estações do ano (janeiro, abril, maio, julho, setembro e dezembro).

4.3.5 Detecção de deformação

Esta etapa consiste em identificar as zonas potenciais de deformação de terreno para que elas possam ser isoladas e protegidas com uma máscara ao longo das diferentes etapas subsequentes de alta resolução. As imagens SLC foram recortadas nos limites da zona urbana de Manaus que representa a área real de interesse deste estudo, o que permite diminuir o tempo de processamento também. Os métodos para identificação destas zonas compreendem o *stacking* dos interferogramas e a verificação da existência do sinal de deformação em interferogramas independentes, ou seja, que não apresentam datas comuns (Figura 29).

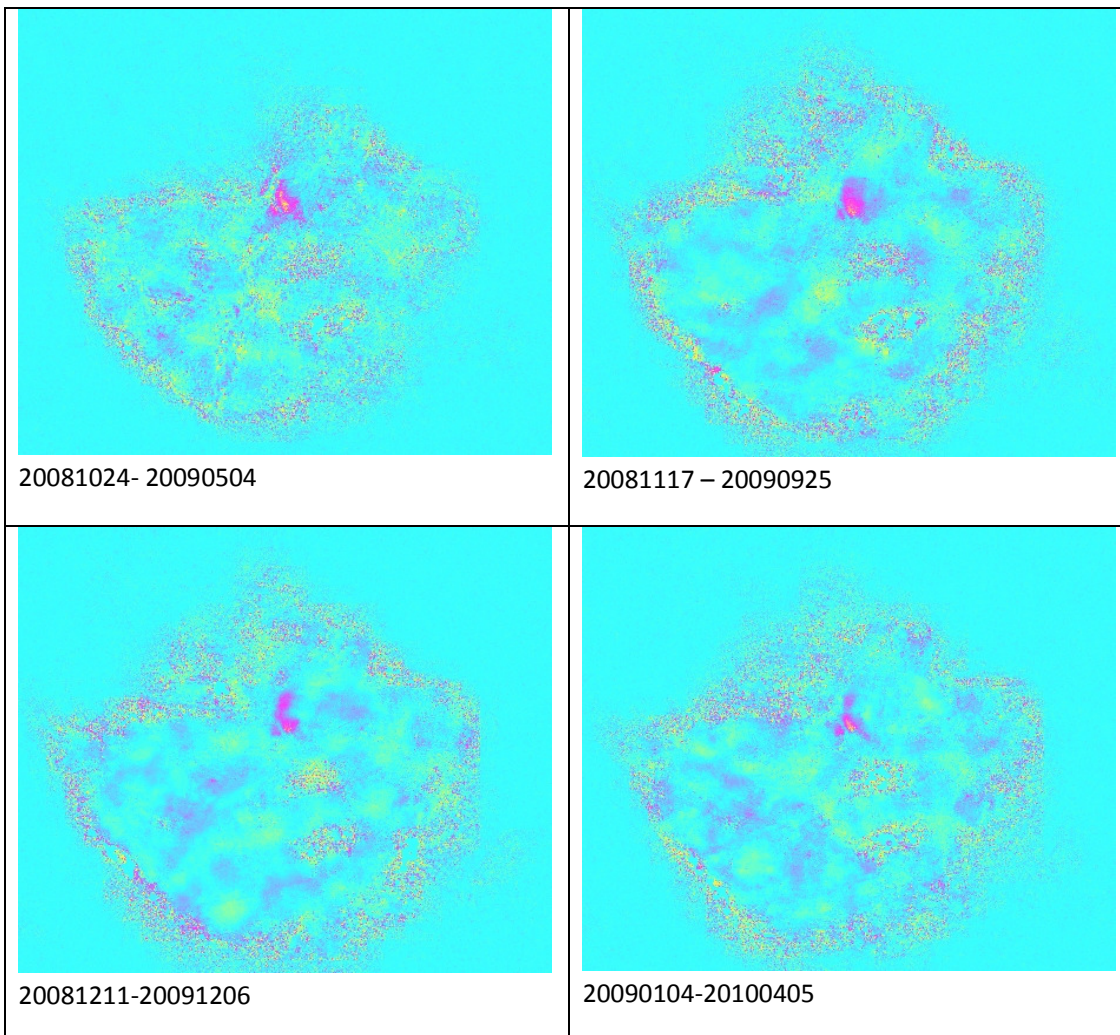


Figura 29– Exemplo de quatro interferogramas independentes que apresentam o sinal de deformação sobre a área urbana de Manaus.

Idealmente, os interferogramas que apresentam o melhor compromisso entre alta coerência, pequena *baseline* perpendicular e intervalo temporal longo são utilizados para o reconhecimento do sinal de deformação. As zonas de deformação são identificadas e mascaradas manualmente sob a forma de polígonos respeitando a forma da feição presente no interferograma de linha de base temporal maior. Tal máscara será utilizada posteriormente na análise de *Point Target* descrita na seção a seguir.

4.3.6 Análise *Point Target* InSAR

A primeira etapa da análise de *Point Target* consiste na identificação de alvos pontuais segundo o método de estabilidade de fase. A Figura 30 apresenta os PTs selecionados em azul sobre a vila urbana de Manaus.

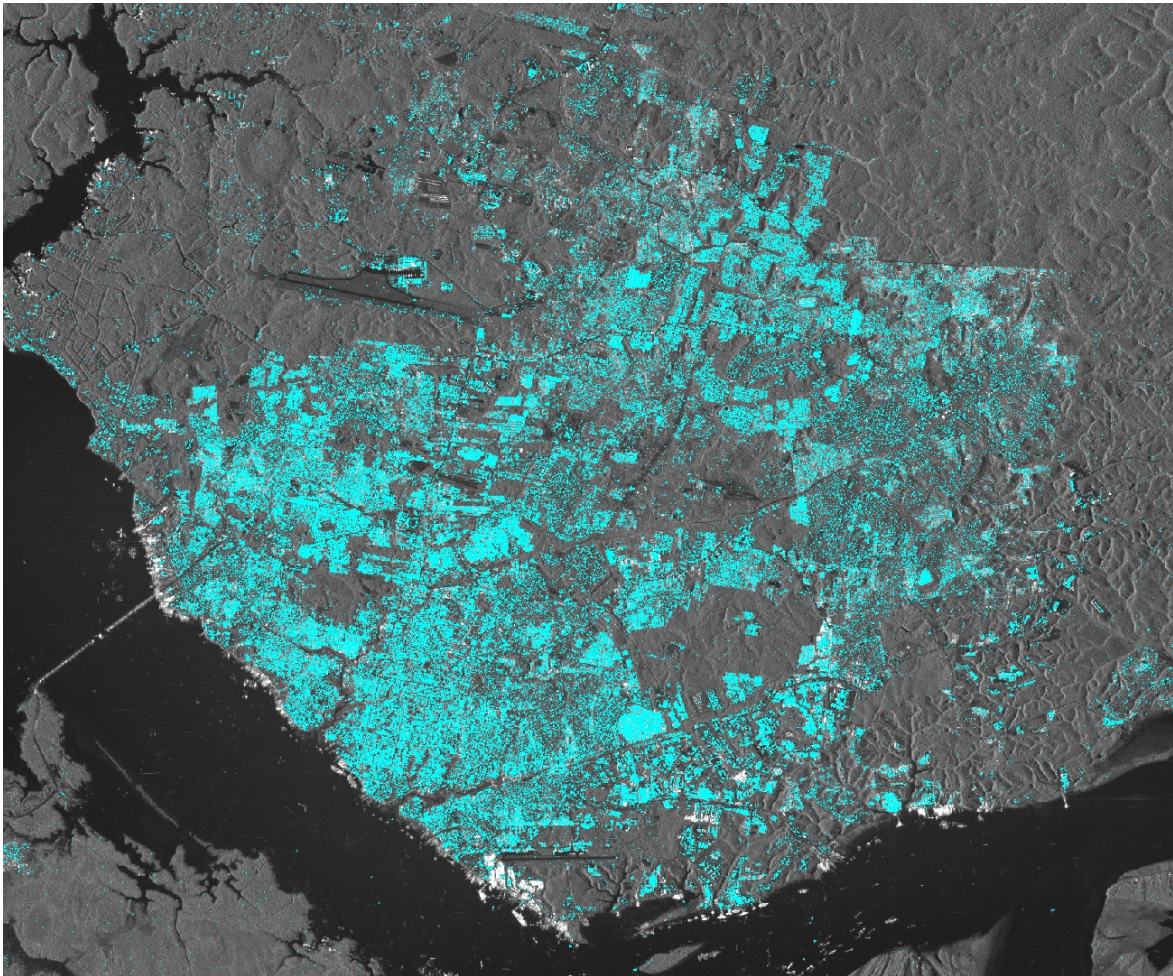


Figura 30– PTs selecionados sobre a área urbana de Manaus.

A seguir, a rede SBAS é formada para a geração de uma MST (*Minimum Spanning Tree*) (Wikipedia) que minimiza as linhas de base perpendiculares absolutas preservando a conectividade da rede. Com o objetivo de aumentar a redundância da rede, a MST é repetida 3 vezes, cada MST precedente é retirada antes de um novo cálculo. Para uma série de imagens SAR com N cenas, $3N - 3$ interferogramas pontuais são conservados. A Figura 31 ilustra a rede SBAS formada a partir da série de 24 imagens Fine do satélite Radarsat-2. As *baselines* temporais não são utilizadas pois a fase já foi determinada como estável durante a seleção dos PTs. A utilização exclusiva das linhas de base

perpendiculares como função de *score* minimiza igualmente as franjas de erro relativas à altimetria, que são difíceis de serem resolvidas pelo desdobramento de fase 3D.

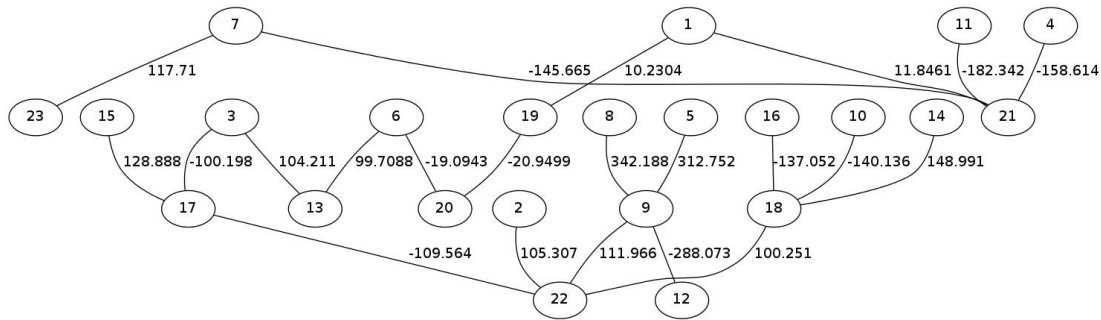


Figura 31–MST da série de imagens de Manaus. Os números dentro dos círculos representam as imagens SAR e os arcos representam os pares e seus valores de *baseline* perpendicular.

As principais etapas da análise de *Point Target Network* são ilustradas na Figura 32 abaixo e descrita a seguir:

- A) Os interferogramas pontuais são gerados na rede SBAS. As variações de fase em longa escala relativas à atmosfera e as franjas de curta escala associadas ao erro de altimetria são evidentes.
- B) As APS geradas durante a etapa anterior de reconhecimento de movimento são reamostradas sobre os PTs para cada interferograma e subtraídas. As variações de fase de curta escala permanecem.
- C) A rede SBAS de interferogramas pontuais é desdobrada espacialmente e temporalmente (3D *unwrapping*).
- D) Cada interferograma é referenciado espacialmente à uma área estável, e depois invertido pelo algoritmo SVD para derivar o valor de fase pontual para cada aquisição. A densidade de franjas locais varia pois a data de referência corresponde à média temporal da série. A informação de fase após o desdobramento 3D e a inversão SVD representa uma melhor estimativa de fase por umadeterminada cena, mas contém ainda as perturbações atmosféricas, o erro de altimetria e a contribuição de atmosfera de curta escala.
- E) As correções de fase, que compreendem a supressão do erro de altimetria e a correção de atmosfera estática, são aplicadas. O erro de altimetria é estimado a partir de uma regressão linear

sobre o histórico de valores de fase temporal em relação à altura e é convertido em fase utilizando a altitude de ambiguidade.

A atmosfera estática é estimada também a partir da regressão linear das variações de fase espacial em relação à altura dos objetos. Tal regressão modela as variações de espessura da coluna atmosférica em relação ao relevo (não significativo em Manaus).

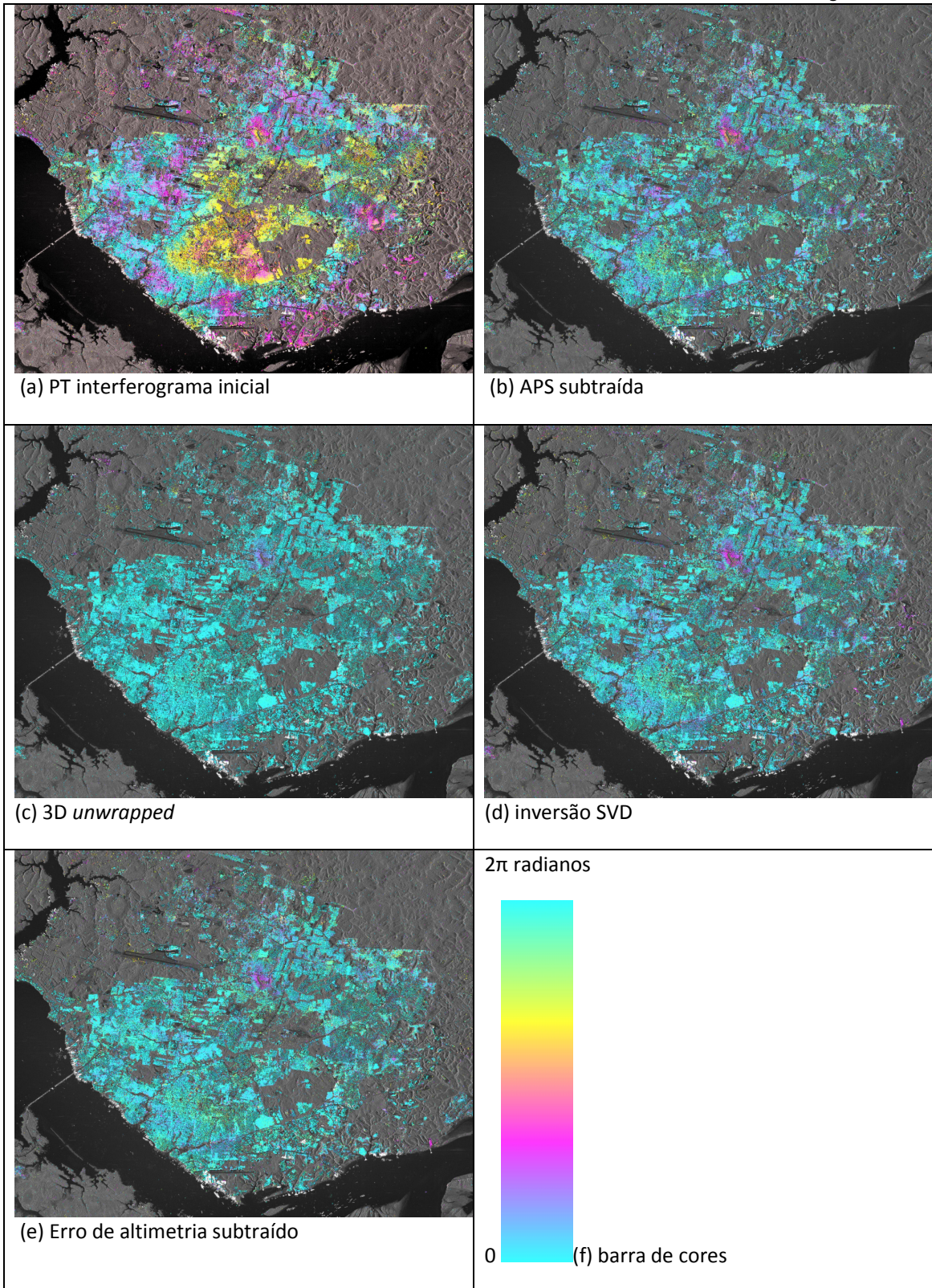


Figura 32– Sequência do processamento Point Target aplicado aos interferogramas Radarsat-2 de Manaus.

Após a análise pontual, cada camada de fase é convertida em deformação (LOS) e então geocodificada. Uma tabela de cores é aplicada à imagem geocodificada antes da publicação no *Google Earth* utilizando um arquivo *Keyhole Markup Language* (KML).

A Figura 33 apresenta os resultados da análise PTInSAR utilizando uma tabela de cores correspondente à -3cm/+3cm sobreposta à imagem ótica disponível no *Google Earth*. A ilustração representa a deformação cumulativa obtida entre outubro de 2008 e janeiro de 2011 sobre a área urbana de Manaus.

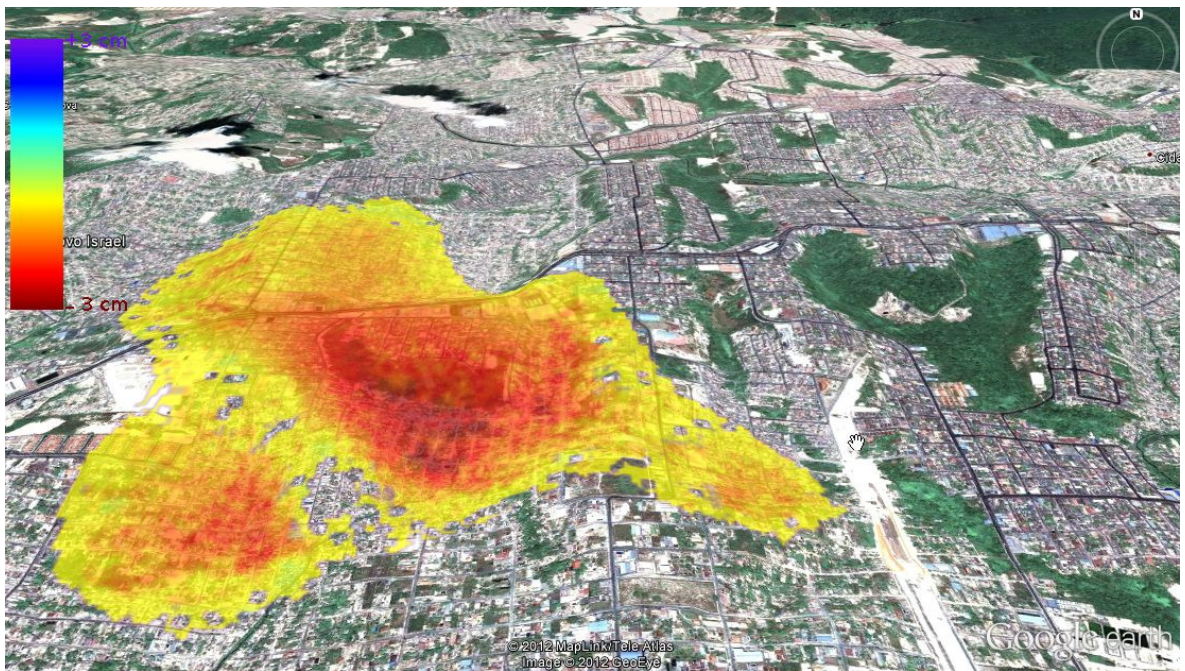


Figura 33 – Deformação cumulativa obtida entre outubro de 2008 e janeiro 2011.

Estes resultados confirmam os resultados preliminares obtidos no processamento dos dados Radarsat-1 onde a feição de movimentação crustal é localizada em área adjacente à uma anomalia circular de drenagem (Figura 34), o que indica uma origem geológica para a existência do movimento de terreno.

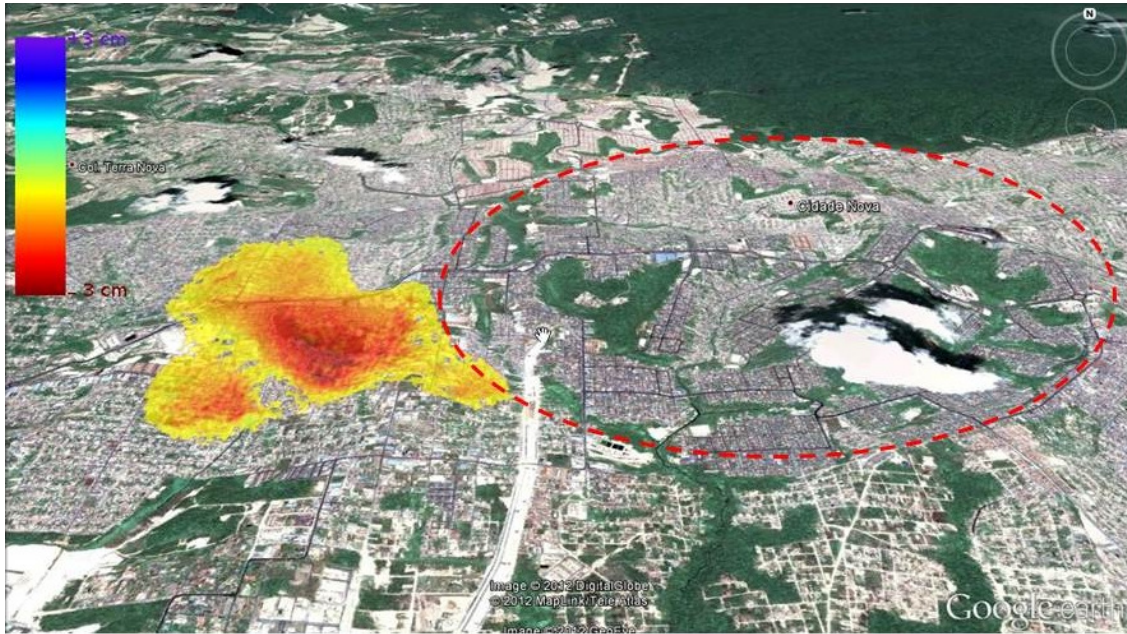


Figura 34— Localização da área de deformação crustal adjacente à anomalia circular de drenagem (em vermelho).

4.3.7 Discussão final e perspectivas

Os resultados demonstram também o período onde os valores de deformação são mais significativos corresponde aos meses de setembro, outubro e novembro de 2008 e 2009. Os valores obtidos para os meses de agosto e setembro também se destacam, porém com menor expressão. Este período coincide com o período de seca do Rio Amazonas, o que pode indicar uma correlação sazonal que representa uma nova contribuição ao conhecimento da área no que diz respeito a estudos de neotectônica sobre a região da Amazônia.



Figura 35— Gráfico da deformação gradual obtida pelo processamento InSAR das imagens Radarsat-2.

5 Conclusões Gerais e perspectivas

Na primeira parte deste documento, foram descritos o problema da extração de medidas de deformação de terreno na Amazônia utilizando sensoriamento remoto, seus princípios e as características dos métodos aplicados, assim como a motivação e o objetivo principal deste estudo.

Nas segundas e terceiras partes, foram apresentados os principais resultados ao longo do desenvolvimento da pesquisa de tese segundo os dois métodos utilizados para processamento de dados interferométricos: a abordagem DInSAR clássica e técnica PTInSAR.

O presente capítulo apresenta a conclusão do estudo realizado a partir do resumo dos principais resultados obtidos, assim como a avaliação de sua contribuição científica face aos problemas específicos apresentados. Finalmente, discutiremos as perspectivas deste trabalho.

5.1 Principais resultados

Esta seção sintetiza os principais resultados obtidos ao longo da pesquisa de tese que serão apresentados em função dos tratamentos realizados sobre s diferentes séries de imagens.

A análise do dados RADARSAT-1 permitiu :

4. A identificação de uma zona de deformação crustal localizada na cidade de Manaus, caracterizada por um movimento lento e gradual entre agosto de 2006 e dezembro de 2007, verificada qualitativamente na série de imagens do satélite Radarsat-1.
5. A análise espacial e caracterização de uma feição na zona urbana de Manaus localizada em adjacência a uma anomalia circular de drenagem obtida a partir da abordagem clássica de interferometria diferencial.
6. A obtenção de 18 medidas de deformação de terreno sobre esta área (**Tableau 3**).

A análise da série de imagens RADARSAT-2 permitiu :

4. A aplicação da abordagem baseada no método *Dual-Scale PSI* publicado por Rabus e Ghuman (2009) sobre a série de 24 imagens do satélite Radarsat-2 obtida entre os anos de 2008 e 2010, a fim de verificar a existência de uma zona de deformação crustal sobre a área urbana de Manaus encontrada no estudo anterior que utilizou a técnica DInSAR sobre os dados Radarsat-1.
5. A aplicação do processamento *Dual-Scale Network* que permitiu:
 - a geração de 244 pares interferométricos ;
 - a seleção visual e numérica de 84 pares a partir principalmente da análise de coerência,
 - a inversão de 19 pares ótimos
 - a obtenção de um perfil temporal da deformação entre os anos de 2008 e 2010.
6. A comparação entre o estudo Radarsat-1 e a estimativa quantitativa de deformação (subsidência) do terreno obtida a partir dos dados Radarsat-2 que convergiram espacialmente e temporalmente.

A validação precisa dos resultados em campo não foi realizada em função da ausência de dados, como uma rede de GPS, por exemplo. Desta forma, a avaliação dos resultados pode ser feita a partir da comparação da feição geológico-geomorfológica encontrada com as informações existentes no domínio da aplicação que permitem definir a pertinência dos resultados interferométricos.

5.2 Contribuições

Nesta seção, serão descritas as principais contribuições deste trabalho para os dois principais domínios científicos envolvidos : o processamento de dados de sensoriamento remoto por radar e a geologia.

Ao que se refere ao tratamento de dados de sensoriamento remoto, foi possível comparar e combinar os principais métodos de interferometria orbital SAR sobre a região da Amazônia. Sob o ponto de vista geológico, este estudo apresenta novos métodos e resultados que permitem ampliar e aprofundar o conhecimento geológico e geomorfológico atual sobre o fenômeno estudado.

5.2.1 Processamento de dados InSAR orbital

A aplicação com sucesso de interferometria diferencial orbital para a medida de deformação do terreno sobre a região da Amazônia brasileira foi possível a partir da adoção de uma estratégia multi-escala de desdobramento de fase, da existência do conhecimento geológico sobre a área e da combinação e comparação dos resultados obtidos a partir das abordagens metodológicas DInSAR et PTInSAR.

Neste trabalho de tese, nos interessamos em aprofundar o conhecimento sobre cada etapa do tratamento aplicado pela primeira vez em uma zona tropical do Brasil. As estratégias bem conhecidas já aplicadas sobre outras regiões do globo foram reproduzidas sobre os dados de Manaus com sucesso, o que representa um avanço principalmente sobre o lado aplicativo das metodologias InSAR. A estratégia PTInSAR proposta foi conduzida com sucesso para a extração de informações relativas aos efeitos atmosféricos fortemente presentes na região da Amazônia.

Ao que concerne ao domínio do sensoriamento remoto por radar, a utilização de duas gerações sucessivas dos sensores SAR, Radarsat-1 et Radarsat-2, permitiu completar e confirmar a veracidade das medidas, com base em duas fontes de dados diferentes e duas abordagens metodológicas que representam o estado-da-arte associados a tais dados.

A convergência dos resultados obtidos a partir de dados de missões sucessivas ilustra a importância da continuidade das observações utilizando-se o mesmo tipo de dados (neste caso banda C), mesmo se a compatibilidade interferométrica entre eles não seja possível.

Desta forma, nossos resultados se aproximam dos estudos que utilizam redes de interferogramas ERS + ENVISAT, onde o processamento inclui redes separadas para cada sensor, porém as informações são complementares ao longo do tempo de observação do fenômeno.

5.2.2 Geologia

Sob o ponto de vista da geologia, a primeira contribuição importante que o presente trabalho fornece se refere à aplicação da interferometria diferencial para a medida de áreas de deformação em terrenos urbanos localizados na bacia sedimentar do Solimões, uma das mais estudadas e importantes do Brasil.

As medidas obtidas com a interferometria orbital SAR representam informações mais precisas relativas à geologia e geomorfologia, o que permite uma abordagem mais adequada para a modelagem geológica e hidrológica desta região, a fim de verificar a presença de movimentos neotectônicos recentes na Amazônia.

Tal contribuição foi alcançada a partir da combinação da correlação das imagens SAR e óticas e das medidas de campo efetuadas em outros trabalhos. As informações geradas neste trabalho de tese complementam os estudos realizados anteriormente.

5.3 Perspectivas

A conclusão deste trabalho oferece perspectivas de melhoria a curto prazo e também linhas de pesquisas mais aprofundadas. A influência dos efeitos atmosféricos nas medidas DInSAR no contexto amazônico pode ainda ser bastante ampliada. Para isso, é necessário o levantamento adequado de dados atmosféricos que possam ser integrados ao sensoriamento remoto por radar e a utilização de sensores SAR com diferentes comprimentos de onda, o que deverá fornecer uma melhor compreensão sobre os limites e potenciais da tecnologia para este tipo de aplicação. A partir de tais estratégias e de sua comparação com outras abordagens será possível obter resultados ainda mais pertinentes e precisos para problemas como o apresentado neste trabalho de tese.

As principais abordagens sugeridas em curto prazo são:

- 3) O tratamento de imagens ALOS arquivadas (18 aquisições) e 30 novas aquisições previstas pelo Programa ALOS-2 recentemente aprovado junto à Universidade Federal do Rio de Janeiro (investigador principal Fernando Pellon de Miranda e co-investigadora Fernanda Ledo G. Ramos) como forma de aprofundar o conhecimento sobre a região amazônica utilizando banda L.
- 4) A comparação entre os resultados já existentes (obtidos com Radarsat-1 e Radarsat-2) e os futuros resultados do satélite ALOS-2 com o objetivo de identificar as vantagens de utilização de cada sensor.

No nível mais metodológico, é importante o aprofundamento sobre os métodos de inversão de rede bem localizadas para que possa mais facilmente processar séries temporais menores e que possuam

feições de pequena extensão no terreno. Enfim, a longo prazo, considerando-se o aspecto fragmentado destas redes originárias de diferentes séries temporais, será igualmente interessante investigar soluções de inversão que explore tanto um período de cobertura temporal como a existência de modelos, permitindo conectar os períodos de medições. Este tipo de estudo, que integra a modelagem às observações parciais irá nos aproximar dos métodos de assimilação de dados atualmente aplicados com sucesso nos domínios científicos de estudos atmosféricos e oceanográficos.

6 Referências Bibliográficas

- Beauducel, B.; Briole, P.; Froger, J.L. Volcano-wide fringes in ERS synthetic aperture radar interferograms of ETNA (1992-1998): Deformation or tropospheric effect? *J. Geophys. Res.* 2000, 105, 16391-16402.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E.,. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 (11), 2002, 2375-2383.
- Bevis, M.; Businger, S.; Herring, T.A.; Rocken, R.; Anthes, R.A.; Ware R.H. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.* 1992, 97, 15787-15801.
- Bevis, M.; Alsdorf, D.; Kendrick, E.; Fortes, L. P.; Forsberg, B. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon river system and Earth's elastic response. *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, pp. 52-163.
- Bock, Y.; Williams, S. Integrated Satellite Interferometry in Southern California. *EOS* 1997, 78(29), 293, 299-300.
- Born, M., Wolf, E., Bhatia, A. B., 1959. *Principle of optics; electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light.* Pergamon Press, New York.
- Chaabane, F.; Avallone, A.; Tupin, F.; Briole, P.; Maître, H., A Multitemporal Method for Correction of Tropospheric Effects in Differential SAR Interferometry: Application to the Gulf of Corinth Earthquake. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.* 2007, 45, 1605-1615.
- Curlander, J. C., McDonough, R. N. *Synthetic Aperture Radar: systems and signal processing.* 1991. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Davis, A.; Marshak, A.; Wiscombe, W.; Cahalan, R. Scale invariance of liquid water distribution in marine stratocumulus. Part I: spectral properties and stationarity issues. *J. Atmos. Sci.* 1996, 53, 1538-1558.
- Delacourt, C.; Briole, P.; Achache, J. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna. *Geophys. Res. Lett.* 1998, 25, 2849-2852.
- Duro, J., Inglada, J., Closa, J., Adam, N., Arnaud, A. High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data. 2004. In: *ENVISAT Symposium*, Salzburg. p. 72.
- Emardson, T.R.; Simons, M.; Webb, F.H. Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *J. Geophys. Res.* 2003, 108, 2231-2238,

- Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Multibaseline InSAR DEM Reconstruction: The Wavelet Approach. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.* 1999, 37, 705-715.
- Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatters in Differential SAR Interferometry. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.* 2000, 38, 2202-2212.
- Ferretti, A.; Prati, C.; Rocca, F. Permanent Scatters in SAR interferometry. *IEEE T. Geosci. Remote Sens.* 2001, 39, 8-20.
- Foster, J.; Brooks, B.; Cherubini, T.; Shacat, C.; Businger, S.; Werner C. Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33, L16304.
- French National Research (ANR) project, "Extraction and Fusion of Information for measuring ground displacements with Radar Imagery (EFIDIR) project. online <http://www.efidir.fr>.
- Fruneau, B.; Sarti, F. Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: isolation of deformation from atmospheric artifact using correlation. *Geophys. Res. Lett.* 2000, 27, 3981-3984.
- Gao, B.-C.; Kaufman, Y.J. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *J. Geophys. Res.* 2003, 108, 4389-4398.
- Ghiglia, D. C., Pritt, M. D., 1998. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., Werner, C. L., 1988. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science* 23 (4), 713-720.
- Goldstein, R.M. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.* 1995, 22, 2517-2520.
- Goldstein, R. M., Werner, C. L., 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters* 25 (21), 4035-4038.
- Guerra, J. B. ; Ccarelli, I.C.F. ; Lomonaco, B. F. Análise da viabilidade do uso das técnicas DInSAR e PSInSAR com dados TerraSAR X para monitorar movimentos da superfície na região da UHE Salto Pirão-SC. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p. 8199.
- Huntley, J. M. (2001). "Three-dimensional noise-immune phase unwrapping algorithm." *Applied Optics* 40(23): 3901-3908.
- Hanssen, R.; Feijt, A. A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry. Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry, 30 Sep.-2 Oct., Zurich, Switzerland, 277-282, 1996.

- Hanssen, R. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry. DEOS Report No.98.1, Delft University press: Delft, the Netherlands, 1998.
- Hanssen, R.F.; Wechwerth, T.M.; Zebker, H.A.; Klees, R. High-resolution water vapor mapping from interferometric radar measurements. *Science* 1999, 283, 1297-1299.
- Hanssen, R., Bamler, R., 1999. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37 (1),318-321.
- Hanssen, R. F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Hooper, A.; Zebker, H.; Segall, P.; Kampes, B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31, L23611.
- Hooper, A. and H. A. Zebker (2007). "Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series." *JOSA A* **24**(9): 2737-2747.
- Hopfield, H. S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data. *Radio Sci.* 1971, 6, 357-367.
- Janssen, V.; Ge, L.L.; Rizos, C. Tropospheric correction to SAR interferometry from GPS observations. *GPS Solut.* 2004, 8, 140-151.
- Jónsson, S. Modeling Volcano and Earthquake Deformation From Satellite Radar Interferometric Observations. Ph.D dissertation, Stanford University, 2002.
- Julea, A.; Ramos, F.L.G.; Méger, N.; *et al.* PolSAR RADARSAT-2 Satellite Image Time Series Mining over the Chamonix Mont-Blanc Test Site. In: IGARSS 2011, Vancouver, Canada
- Kampes, B., 2006. Radar interferometry: persistent scatterer technique. Springer.
- Lee, J. S., Hoppel, K. W., Mango, S. A., Miller, A. R., 1994. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30, 1017.
- Leighton, J. M. 2010. GPS and PSI Integration for Monitoring Urban Land Motion. Thesis of degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham. Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy.
- Li, Z.H.; Muller, J.-P.; Cross, P.; Fielding, E.J. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration, *J. Geophys. Res.* 2005, 110, B03410.

- Li, Z. W.; Ding, X.L.; Liu, G.X. Modeling Atmospheric Effects on InSAR with Meteorological and Continuous GPS Observations: Algorithms and Some Test results. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2004, 66, 907-917.
- Li, Z.H.; Fielding, E.J.; Cross, P.; Muller, J.-P. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model, *J. Geophys. Res.* 2006, 111, B02404, doi:10.1029/2005JB003711.
- Li, Z. H.; Muller, J. P.; Cross, P.; Albert, P.; Fischer, J.; Bennartz, R. Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements. *Int. J. Remote Sens.* 2006, 27, 349-365.
- Li, Z.W.; Ding, X.L.; Huang, C.; Zou, Z.R. Atmospheric effects on repeat-pass InSAR measurements over Shanghai region. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2007, 69: 1344-1356.
- Li, Z., Bethel, J., 2008. Image coregistration in SAR interferometry. In: *ISPRS08*. p.B1: 433.
- Liu, Y. Remote Sensing of Water Vapor Content Using GPS Data in Hong Kong Region. Ph.D dissertation, Hung Hom, Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- Lohman, R.B.; Simons, M. Some thoughts on the use of InSAR data to constrain models of surface deformation: Noise structure and data downsampling. *Geochem. Geophys. Geosys.* 2005, 6, Q01007.
- Lu, Z.; Wicks, C.; Jr., O. K.; Power, J.A.; Dzurisin, D. 1996. Surface deformation associated with the March 1996 earthquake swarm at Akutan Island, Alaska, revealed by C-band ERS and L-band JERS radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, n. B7, 2354, doi: 10.1029/2002JB002311, 2003.
- Macedo, K. A. C. ; Wimmer, C. ; Barreto, T. L. M. ; Lübeck, D. ; Moreira, J.R. ; Rabaco, L.M.L. ; Oliveira, W. J. Operacionalização da Interferometria Diferencial (D-InSAR) para o sistema OrbISAR – Estudo de caso realizado na região de São Sebastião, SP. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p. 8207.
- Massonnet, D.; Feigl, K. Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms. *Geophys. Res. Lett.* 1995, 22, 1537-1540
- Massonnet, D., Feigl, K. L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36 (4), 441-500.
- Massonnet, D.; Souyris, J.C. 2008 *Imaging with synthetic aperture radar*. EPFL Press, ISBN 0849382394, 9780849382390, pp. 280.
- Mora, O., Mallorqui, J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 (10), 2243-2253

- Onn, F. Modeling water vapor using GPS with application to mitigating InSAR atmospheric distortions. Ph.D dissertation, Stanford University, 2006; P. 176.
- Onn, F.; Zebker, H.A. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GOS network. *J. Geophys. Res.* 2006, 111, B09102, doi: 10.1029/2005JB004012
- Petrobras, 2008, Aplicação de Tecnologia INSAR Orbital na Bacia Hidrográfica do Rio Solimões, Amazônia: Relatório de Análise Temporal InSAR Orbital, 19 de dezembro de 2009, pp.38.
- Puysségur, B.; Michel, R.; Avouac, J.-P. Tropospheric phase delay in interferometric synthetic aperture radar estimated from meteorological model and multispectral imagery. *J. Geophys. Res.* 2007, 112, B05419.
- Rabus B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. 2003. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, *ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 57, pp. 241-262.
- Rabus, B. T. and P. S. Ghuman (2009). "A simple robust two-scale phase component inversion scheme for persistent scatterer interferometry (dual-scale PSI)." *Canadian Journal of Remote Sensing* 35(4): 399-410
- Ramos, F.L.G. Utilização de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e mosaico SRTM) para mapeamento de atividades neotectônicas na região de Manaus (AM). 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro. 2009.
- Ramos, F. L. G. ; Landau, L. ; Miranda, F. P. ; Silva, C. L. . Use of Information derived from radar remote sensing (Radarsat-1 Interferometry and SRTM mosaic) for mapping neotectonic activities in the region of Manaus city (Amazonas state). 2009.
- Ramos, F. L. G. ; Miranda, F. P.; Landau L.; Silva, C. L. Detecção de movimentação crustal recente em Manaus (AM) utilizando informações de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e modelo digital de elevação da SRTM). *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p. 8162.
- Ramos, F. L. G.; Rosu, D.-C.; Trouvé, E.; Vernier, F.; Nicolas, J.-M.; Fallourd, R.; Yan, Y.; Ponton, F.; de Miranda, F. P. Automatic Coregistration and Simulated Fringe removal by a direct estimation from high resolution DEM and Orbital data. *Abstract FRINGE Workshop 2011*, European Space Agency, Frascati, Italy.
- Ramos, F. L. G.; Nico, G. Atmospheric Effects Detection by Short Baseline Processing in RADARSAT Time Series over Manaus city, Amazon Region. *FRINGE Workshop 2011*, European Space Agency, Frascati, Italy.

- Ramos, F. L. G; Miranda, F.P., Evsukoff, A. G.; Galychet, S.; Trouvé, E. Fusion d'informations issues de télédétection radar (Interférogrammes RadarSat-1 et MNT SRTM) pour l'observation de déplacement dans la région de Manaus (Amazonie, Brésil), *Revue Française de Télédétection et Photogrammétrie, SFTP*, 2012.
- Rosen, P.A.; Hensley, S.; Zebker, H.A.; Webb, F.H.; Fielding E.J. Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. *J.Geophys. Res.* 1996, 101, 23109-23125.
- Saastamoinen, J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The use of artificial satellites for Geodesy, *Gephys. Monogr. Ser.* 1972, 247-251.
- Sandwell, D.T.; Price, E.J. 1998. Phase gradient approach to stacking interferograms. *Journal of Geophysical Research* 103 (B12), 30183-30204.
- Sapucci, L. F. (2005). Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a geodésia e a meteorologia. *Ciências Cartográficas*. Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista. Tese (PhD.): 200.
- Sarti, F.; Vadon, H.; Massonnet, D. A method for the automatic characterization of atmospheric artifacts in SAR interferograms by correlation of multiple interferograms over the same site. *Proceedings of IGARRS'99, Hamburg, Germany, 28 June-2 July 1999.*
- Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Relatório Final de Cheia 2008. http://www.cprm.gov.br/rehi/manaus/pdf/rel_final_2008.pdf
- Scheiber, R. and A. Moreira (2000). "Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(5): 2179 -2191.
- Skolnik, M., 1990. Radar handbook. McGraw-Hill Professional.
- Stoica. P. ; Nehorai, A. "MUSIC, maximum likelihood, and Cramer–Rao bound," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 37, pp. 720–741, May 1989.
- Tapley, B.D.; Bettadpur, S.; Ries, J. C.; Thompson, P.F.; Watkins, M.M. 2004. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. In: *Science Reports*, Vol. 34, pp. 503-505.
- Tarayre, H.; Massonnet, D. Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1. *Geophys. Res. Lett.* 1996, 23, 989-992.
- Tatarski, V.I. Wave propagation in a turbulent medium. McGraw-Hill: New York, 1961.
- Towne, D., 1988. Wave phenomena. Dover Publications.
- Trouvé, E., M. Caramma, and H. Maître, "Fringe detection in noisy complex interferograms," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 3799–3806, July 1996.
- Zebker, H. A., Goldstein, R. M., 1986. Topographic mapping from interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *Journal of Geophysical Research* 91 (B5), 4993-4999.

- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., Werner, C. L., 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research* 99, 19617-19634.
- Zebker, H. A.; Rosen, P. A.; Hensley, S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J. Geophys. Res.* 1997, 102, 7547-7563.
- Zebker, H., Lu, Y., 1998. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms. *Journal of the Optical Society of America A* 15 (3), 586 - 598.
- Wadge, G.; Webley, P.W.; James, I.N.; Bingley, R.; Dodson, A.; Waugh, S.; Veneboer, T.; Puglisi, G.; Mattia, M.; Baker, D.; Edwards, S.C.; Edwards, S.J.; Clarke, P.J. Atmospheric models, GPS and InSAR measurements of the tropospheric water vapor fields over Mount Etna. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29, 1905-1908.
- Warren, M., 2007. The development of a 3-pass persistent scatterer algorithm using the integer ambiguity search method. Ph.D. thesis, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy.
- Webley, P.W.; Bingley, R.M.; Dodson, A.H.; Wadge, G.; Waugh, S.J.; James, I.N. Atmospheric water vapor correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna. *Phys. Chem. Earth.* 2002, 27, 363-370.
- Webley, P.W. Atmospheric water vapor correction to InSAR surface motion measurements on mountains: Case Study on Mount Etna. Ph.D dissertation, Reading, University of Reading, UK, 2003.
- Webley, P.W.; Wadge, G.; James, I.N. Determining radio wave delay by non-hydrostatic atmospheric modeling of water vapour over mountains. *Phys. Chem. Earth.* 2004, 29, 139-148.
- Wegmuller, Urs; Werner, Charles. Gamma SAR processor and interferometry software. ESA SP, p. 1687-1692, 1997.
- Wegmuller, U., Strozzi, T., Tosi, L., 2000. ERS and ENVISAT differential SAR interferometry for subsidence monitoring. In: ERS - ENVISAT Symposium. pp. 685-692.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., Wiesmann, A., 2003. Interferometric PointTarget Analysis for deformation mapping. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 21-25 July 2003. pp. 3 pages, cdrom.
- Williams, S.; Bock, Y.; Fang, P. Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar product. *J. Geophys. Res.* 1998, 103, 27051-27068.

Woodhouse, I. H., 2006. Introduction to Microwave Remote Sensing. Taylor & Francis, Boca Raton, FL.