

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE

Projeto principal: Consolidação da Componente Nacional de Previsão Numérica do Sistema Terrestre com o Model for Ocean-land-Atmosphere Prediction (MONAN)

Subprojeto no Macrogrupo: Assimilação de dados e estruturação do sistema MONAN-JEDI

Título do Projeto: Estruturação e Consolidação da Assimilação de Radiâncias Atmosféricas no Sistema MONAN-JEDI

Supervisão: pesquisador(a) do Grupo de Assimilação de Dados a ser designado(a)

Modalidade da bolsa: PCI-D, categoria D-C

Duração e quantidade: 48 meses; 1 bolsa

1. Resumo

Este projeto propõe estruturar e consolidar, ao longo de 48 meses, uma capacidade científica e tecnológica permanente para a assimilação de radiâncias atmosféricas no sistema MONAN-JEDI. O trabalho partirá das experiências acumuladas pelo grupo de assimilação de dados em sistemas anteriores, no processamento de observações de satélite e em estudos com sondadores de micro-ondas, integrando essas contribuições em uma estrutura comum de desenvolvimento, validação, documentação e continuidade científica. O primeiro ano será dedicado à sistematização desse conhecimento, à capacitação orientada, à reprodução de casos de referência e à validação da cadeia de assimilação IODA-UFO-CRTM-MONAN. A partir dessa fundação comum, serão selecionados e incorporados progressivamente instrumentos de micro-ondas e, conforme a maturidade do sistema, outras classes de radiâncias relevantes. O bolsista trabalhará em colaboração com integrantes do Grupo de Assimilação de Dados, incluindo ao menos um pesquisador em formação para assumir futuramente a continuidade da área. Alterações de código-fonte serão incorporadas ao repositório MONAN-JEDI; preparação de dados, execução dos ciclos, diagnósticos, testes do fluxo de execução e configurações experimentais serão mantidos no repositório monan-jedi-workflow no GitHub. O resultado esperado é ambiente de trabalho institucionalizado, sustentável, documentado e compartilhado, com resultados científicos e funcionalidades efetivamente integradas ao sistema MONAN-JEDI.

Palavras-chave: assimilação de dados; radiâncias; satélites meteorológicos; MONAN; JEDI; UFO; IODA; CRTM; MPAS-JEDI; previsão numérica do tempo.

2. Contexto institucional e científico

O Grupo de Assimilação de Dados do INPE/CPTEC está implantando o MONAN-JEDI como novo ambiente de assimilação associado ao MONAN (Model for Ocean-land-Atmosphere Prediction). O plano de desenvolvimento corrente parte da consolidação da infraestrutura de software e da matriz de covariâncias do erro de background, avança pela implementação do 3DVar/FGAT e de ciclos experimentais e prevê posterior evolução para formulações híbridas. Nesse contexto, o uso de radiância é uma frente essencial: essas observações oferecem cobertura global e informação integrada sobre temperatura, umidade, superfície e nuvens, constituindo uma das fontes mais influentes nos sistemas modernos de previsão numérica (Eyre et al., 1993; Duruisseau et al., 2022).

A experiência acumulada no sistema previamente em uso - SMNA (Sistema de Modelagem Numérica e Assimilação de dados), no processamento de observações de satélite e em atividades anteriores com instrumentos como o Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) fornece casos, conhecimento técnico e resultados que devem ser recuperados e incorporados ao novo desenvolvimento. Essa base reduz o risco de começar do zero, mas não elimina a necessidade de capacitar, organizar, documentar e validar uma cadeia própria no MONAN-JEDI. A consolidação envolverá conversão para Interface for Observation Data Access (IODA), disponibilidade das variáveis do modelo, configuração do Community Radiative Transfer Model (CRTM), seleção de canais, filtros Unified Forward Operator (UFO), correção de viés, erros observacionais, minimização variacional, diagnósticos e execução cíclica. Como o bolsista poderá ingressar sem experiência aprofundada em radiâncias, o plano adotará uma progressão baseada em casos reproduzíveis e critérios objetivos de avanço. A escolha dos primeiros instrumentos não será fixada a priori: considerará a experiência disponível no grupo, a continuidade das missões, a disponibilidade e a qualidade dos dados, o conteúdo de informação dos canais e a maturidade das interfaces do MONAN-JEDI.

2.1 Experiência acumulada e base para a consolidação

Nos últimos anos, o grupo reuniu experiências úteis em diferentes partes da cadeia: preparação e controle de qualidade de observações, execução do SMNA, adaptação do ambiente computacional, uso de operadores de observação e estudos com radiâncias de micro-ondas. O projeto organizará esse conhecimento em uma base comum, verificável e compartilhada. Para isso, cada experiência anterior será avaliada quanto à possibilidade de reprodução no MONAN-JEDI, às dependências ainda ausentes e à sua utilidade como caso de teste, referência científica ou ponto de partida para novas funcionalidades. As componentes e as experiências com o SMNA a serem incorporadas ao novo sistema MONAN-JEDI, estão sumarizadas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Componentes e experiências a serem incorporadas do MONAN-JEDI.

Componente	Experiência ou condição inicial	Incorporação no projeto
Processamento de observações	Rotinas e experiência acumuladas no tratamento de dados convencionais e de satélite.	Reutilização e generalização de procedimentos de aquisição, conversão, controle e monitoramento.
SMNA e ambiente computacional	Casos executados, diagnósticos existentes e experiência de implantação na infraestrutura do INPE.	Reprodução de casos e comparação com a nova cadeia MONAN-JEDI.
Radiâncias de micro-ondas	Experiência acumulada com sondadores, inclusive ATMS, disponível para sistematização e incorporação ao MONAN-JEDI.	Recuperação dos experimentos, avaliação crítica e transformação em casos reproduzíveis.
Componentes JEDI	Conhecimento em formação sobre IODA, UFO, CRTM e MPAS-JEDI.	Integração, testes e documentação no contexto específico do MONAN.
Organização institucional	Conhecimento distribuído entre diferentes atividades e integrantes, com necessidade de mecanismos comuns de documentação e continuidade.	Trabalho colaborativo, documentação contínua e formação de uma referência técnica permanente no grupo.

A priorização instrumental será revista ao longo do projeto. Sondadores de micro-ondas, como ATMS, AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A), MHS (Microwave Humidity Sounder) e MWS (MicroWave Sounder), fornecem uma sequência cientificamente coerente para estudar temperatura, umidade, superfície, nuvens e efeitos instrumentais, mas possuem diferentes horizontes de disponibilidade e maturidade. Instrumentos atuais poderão sustentar configurações de referência; séries históricas poderão apoiar reprodução, regressão e estudos de consistência; sensores de novas gerações serão considerados quando houver dados, coeficientes e suporte adequados. Em todos os casos, a seleção será feita por plataforma e canal, com consulta aos boletins operacionais dos centros de previsão numérica, monitoramento da qualidade e análise do conteúdo de informação. Essa estratégia evita vincular quatro anos de trabalho a um único instrumento e, ao mesmo tempo, preserva uma sequência experimental factível.

O projeto é simultaneamente científico e de desenvolvimento tecnológico. Não se limita a testar configurações: deverá entregar alterações de código-fonte, conversores, testes automatizados, documentação e experimentos reproduzíveis. As mudanças em componentes e interfaces do sistema serão desenvolvidas no repositório MONAN-JEDI; os arquivos de configuração e os elementos de preparação, execução e diagnóstico dos experimentos serão desenvolvidos no repositório monan-jedi-workflow no GitHub. O bolsista atuará como responsável técnico-científico da frente de radiâncias, sob supervisão e revisão do Grupo de Assimilação de Dados (GAD), em interação com as frentes de observações, modelo, núcleo variacional, matriz B, avaliação e infraestrutura.

3. Problema de pesquisa

Como integrar, ampliar e consolidar as experiências acumuladas pelo grupo em uma área institucional, progressiva, reproduzível e cientificamente fundamentada de assimilação de radiâncias atmosféricas no MONAN-JEDI, considerando o estágio atual do sistema, a formação do bolsista e a necessidade de produzir funcionalidades integradas, testadas, documentadas e apropriadas pela equipe do GAD?

3.1 Questões norteadoras

- Quais sensores, plataformas e canais oferecem maior conteúdo de informação e melhor relação custo-benefício para a primeira implementação operacional?
- Quais componentes do erro sistemático decorrem do instrumento, da geometria de varredura, da superfície, do operador radiativo e do background do MONAN?
- Quais filtros, erros observacionais e preditores de correção de viés produzem inovação positiva sem reduzir excessivamente o volume de dados?
- Como o impacto muda entre regiões, níveis atmosféricos, estações do ano, regimes meteorológicos e resoluções de grade?
- Até que ponto o tratamento de nuvens, emissividade de superfície e correlação entre canais permitem ampliar com segurança o conjunto assimilado?
- Quais requisitos de software, testes e monitoramento tornam a solução sustentável em ciclos contínuos de assimilação de dados com o MONAN-JEDI no ambiente do INPE?

3.2 Hipóteses de trabalho

- Uma implantação incremental, iniciada por instrumentos e canais para os quais existam experiência, dados e suporte técnico suficientes, em céu predominantemente claro, reduzirá o risco de degradação e permitirá identificar as fontes de erro antes da expansão multissensor.

- A correção de viés adaptativa, combinada a filtros coerentes com o instrumento, superfície e condição de nuvem, produzirá distribuições de O-B e O-A mais próximas das hipóteses usadas pelo método variacional.
- A escolha de canais e erros baseada em evidência no MONAN superará a simples reprodução de configurações de outros centros operacionais ou do sistema anterior SMNA.
- Testes automatizados, proveniência dos coeficientes e configurações versionadas são condições científicas de reprodutibilidade e não apenas atividades auxiliares de engenharia.

4. Justificativa

Radiâncias representam a medida diretamente observada pelos instrumentos, evitando parte das hipóteses introduzidas por produtos recuperados (Eyre et al., 1993; Rodgers, 2000). Seu uso, entretanto, exige que o modelo e o operador sejam comparáveis no espaço da observação. Erros na temperatura, umidade, ozônio, pressão de superfície, emissividade ou representação de nuvens podem aparecer como desvios de brilho e ser confundidos com falhas instrumentais. Por isso, o desenvolvimento deve articular ciência atmosférica, transferência radiativa, assimilação variacional e engenharia de software (Derber e Wu, 1998; Duruisseau et al., 2022).

Para o INPE, a contribuição institucional é dupla. Primeiro, amplia a utilização de uma fonte central de observações no futuro sistema de assimilação do MONAN. Segundo, forma e fixa competência para manter a cadeia completa, reduzindo a dependência de configurações externas. O horizonte de quatro anos é adequado porque permite passar de provas de conceito para ciclos sazonais, investigar questões científicas de maior risco e concluir a transferência tecnológica com documentação e treinamento.

5. Objetivos

5.1 Objetivo geral

Estruturar, desenvolver, implementar e avaliar uma área científica e tecnológica robusta e reprodutível de assimilação de radiâncias atmosféricas no MONAN-JEDI, aproveitando a experiência acumulada pelo grupo, incorporando progressivamente instrumentos prioritários e formando uma equipe capaz de assegurar sua continuidade.

5.2 Objetivos específicos

1. Inventariar e priorizar sensores, canais, formatos, coeficientes e requisitos de variáveis do modelo.
2. Implementar e validar conversores para IODA e rotinas de preparação, verificação e monitoramento das observações.
3. Integrar e validar o operador CRTM na cadeia de assimilação do MONAN-JEDI, incluindo coeficientes, GeoVaLs (Geophysical Variables at Locations), os operadores tangente linear (TL) e adjunto (AD), as jacobianas de sensibilidade (K-matrix) e testes de consistência, com sua execução organizada pelo monan-jedi-workflow.
4. Desenvolver configurações de controle de qualidade, *thinning*, seleção de canais, erros observacionais e correção variacional de viés no UFO.
5. Realizar estudos de sensibilidade em HofX, 3DVar/FGAT e, quando disponível, sistema híbrido, isolando o efeito de sensores e canais.

6. Caracterizar, por meio de experimentos controlados, a sensibilidade da assimilação às escolhas de canais, controle de qualidade, erros observacionais, superfície e correção de viés.
7. Selecionar e incorporar progressivamente instrumentos de micro-ondas e, quando factível, de infravermelho, condicionando cada avanço à relevância científica, à disponibilidade e qualidade dos dados, à maturidade das interfaces e aos resultados das etapas anteriores.
8. Quantificar o impacto por meio de estatísticas no espaço da observação e do modelo, verificações de previsão e métricas computacionais.
9. Entregar alterações de código revisadas no MONAN-JEDI e arquivos de configuração, testes de execução, documentação, tutoriais e rotinas de monitoramento no monan-jedi-workflow.
10. Produzir resultados científicos publicáveis e transferir continuamente o conhecimento para os integrantes do GAD, com participação sistemática de ao menos um pesquisador do quadro em formação para assumir a continuidade técnica da área.

6. Escopo e estratégia de priorização

Prioridade	Conteúdo	Critério de avanço
P1 - Fundacional	Sondador(es) de micro-ondas selecionado(s) após inventário; canais de menor complexidade; céu claro ou filtragem conservadora; capacitação e reprodução de casos anteriores.	Pipeline IODA–UFO–CRTM–MONAN validado; estatísticas de HofX consistentes; testes automatizados aprovados.
P2 - Consolidação	Correção de viés, superfície, canais adicionais e incorporação de um segundo instrumento ou plataforma com características complementares.	Impacto neutro ou positivo em ciclos independentes e estabilidade computacional.
P3 - Expansão	Sensores hiperespectrais e estratégias de redução/seleção de canais; erros correlacionados.	Ganho de informação demonstrado e custo compatível com o fluxo.
P4 - Pesquisa avançada	Radiâncias afetadas por nuvens/all-sky, propriedades de nuvens/hidrometeoros e preditores associados.	Variáveis do modelo e operador adequados; diagnóstico de viés e não linearidade; aprovação em portão científico.

A implementação inicial será definida a partir de um inventário técnico-científico das experiências do grupo, dos dados disponíveis e das condições do MONAN-JEDI. ATMS, AMSU-A, MHS, MWS (Microwave Sounder, da série MetOp-SG) e outros instrumentos poderão compor os casos de referência ou as etapas de expansão, sem que o êxito do projeto dependa antecipadamente de um único sensor. A passagem de uma etapa para outra dependerá de testes reproduzíveis, disponibilidade das variáveis do modelo, qualidade das simulações HofX, estabilidade computacional e avaliação científica. Atividades avançadas, como assimilação multissensor, radiâncias infravermelhas, erros correlacionados e radiâncias afetadas por nuvens, serão executadas somente se os componentes fundamentais estiverem maduros.

7. Metodologia e pacotes de trabalho

PT1 - Requisitos, dados e reprodutibilidade

O primeiro pacote combinará capacitação e levantamento técnico. O bolsista deverá compreender a arquitetura do MONAN-JEDI, a representação das observações em IODA, os filtros e operadores do UFO, o funcionamento do CRTM e as variáveis do MONAN utilizadas na simulação. Será elaborado um inventário versionado de sensores,

canais, formatos, coeficientes, requisitos de GeoVaLs, disponibilidade e limitações conhecidas. Casos mínimos de referência permitirão que o bolsista e outros integrantes reproduzam cada etapa no supercomputador Jaci e em ambiente de desenvolvimento.

- Conversores ou adaptações de conversores para IODA-v2;
- testes unitários com pequenas amostras e testes de integração com ciclos reais;
- relatórios automáticos de disponibilidade, rejeição e distribuição espacial;
- casos de referência versionados para reprodução no supercomputador Jaci e em ambiente de desenvolvimento.

PT2 - Operador radiativo e interface com o MONAN

O CRTM será validado inicialmente por meio de HofX, comparando brilho observado e simulado antes da assimilação. Serão verificadas a orientação vertical, unidades e preenchimento de temperatura, umidade, pressão, ozônio, variáveis de superfície e, nas fases avançadas, nuvens e hidrometeoros. A consistência dos operadores não linear, tangente linear e adjunto será testada conforme os requisitos das aplicações variacionais. Perfis e jacobianas (matrizes de sensibilidade, ou K-matrizes) serão usados para interpretar a sensibilidade vertical de cada canal e apoiar a seleção de canais.

PT3 - Controle de qualidade e caracterização de erros

Serão avaliados filtros UFO para *gross check*, domínio, canais, superfície, topografia, nuvens, emissividade, consistência temporal e espacial e *thinning*. Estatísticas robustas de O-B serão estratificadas por sensor, plataforma, canal, ângulo de visada, latitude, superfície, condição atmosférica e horário. Os erros observacionais serão ajustados de forma controlada e documentada. Como radiâncias de sondadores apresentam correlações espaciais e entre canais que podem invalidar a hipótese diagonal, serão estudadas, quando pertinente, matrizes de correlação, *inflation*, *thinning* e redução de canais em experimentos comparáveis (Bormann e Bauer, 2010).

PT4 - Correção de viés

A correção variacional de viés será configurada e avaliada com preditores apropriados, como ângulo de varredura, massa de ar e termos dependentes do estado. Serão analisados *spin-up*, estabilidade dos coeficientes, separação entre viés do modelo e do instrumento e risco de o método *absorber* sinal meteorológico, limitações reconhecidas na aplicação da correção variacional de viés (VarBC) a radiâncias (Dee e Uppala, 2009). Para condições nubladas, poderão ser estudados preditores baseados em impacto simétrico de nuvem, desde que suportados pela versão adotada do UFO e pelo conjunto de GeoVaLs do MONAN (Geer e Bauer, 2011; Duncan et al., 2022).

PT5 - Experimentos de assimilação e atribuição de impacto

Os experimentos seguirão uma hierarquia compatível com a formação progressiva do bolsista: recuperação e reprodução de casos existentes; monitoramento passivo e HofX do instrumento inicial; testes unitários com subconjuntos de canais; 3DVar ou FGAT em períodos curtos; avaliação dos incrementos; ciclos mais longos; períodos independentes; e expansão para outro instrumento. Essa progressão permitirá separar problemas de dados, operador, controle de qualidade, correção de viés, modelo e infraestrutura.

PT6 - Desenvolvimento, integração contínua e operação

As funcionalidades serão desenvolvidas em *branches* rastreáveis no GitHub, submetidas a revisão e integradas por *pull requests* no repositório correspondente. O repositório

MONAN-JEDI receberá mudanças no código-fonte, nas interfaces com o modelo e nos componentes que precisarem ser modificados para viabilizar a assimilação de radiâncias. O repositório monan-jedi-workflow receberá os arquivos YAML comentados, as tabelas de sensores e canais, os procedimentos de preparação das observações, os *scripts* de submissão e execução, os diagnósticos e as configurações dos experimentos. Cada entrega deverá incluir dados mínimos de teste ou um mecanismo documentado para obtê-los, teste automatizado, resultado esperado, documentação de uso e registro das versões do JEDI, do CRTM e dos coeficientes. O workflow deverá produzir diagnósticos, detectar a ausência de observações ou anomalias nelas e permitir a reexecução independente. Mudanças genéricas que possam ser úteis à comunidade JEDI serão propostas aos projetos de origem quando isso for tecnicamente viável.

PT7 - Avaliação científica, documentação e capacitação

A avaliação combinará métricas no espaço da observação e do modelo, acompanhadas de revisão técnica e interpretação científica por mais de um integrante do grupo. Relatórios e rotinas de diagnóstico deverão ser compreensíveis e reproduzíveis por pesquisadores que não participaram diretamente de sua elaboração. Uma eventual fase *all-sky* permanecerá condicionada à maturidade do sistema.

7.8 Organização colaborativa e continuidade institucional

O projeto será executado como uma atividade do grupo, e não como uma frente isolada do bolsista. A supervisão, a referência técnica em formação, a implementação e as interfaces com os demais componentes do MONAN-JEDI terão responsabilidades complementares, conforme a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Papéis, responsabilidades e resultados esperados.

Papel	Responsabilidade no projeto	Resultado esperado
Supervisor(a) da bolsa - coordenação científica e institucional	Acompanhar o plano, organizar prioridades, remover impedimentos e integrar as entregas ao planejamento do GAD.	Entregas alinhadas ao MONAN-JEDI e avaliadas regularmente.
Pesquisador(a) do quadro em formação - apropriação do conhecimento e continuidade da área	Participar do planejamento, das revisões, dos experimentos e da documentação, apropriando-se progressivamente dos métodos e ferramentas.	Capacidade para assumir, em conjunto com os membros do grupo, a responsabilidade pela frente de radiâncias.
Bolsista	Executar pesquisa, implementação, testes, experimentos, diagnósticos e documentação em interação contínua com a equipe.	Funcionalidades reproduzíveis, código revisado e resultados científicos.
Demais integrantes do GAD	Colaborar nas interfaces de observações, modelo, matriz B, método variacional, workflow, avaliação e infraestrutura.	Integração ao sistema completo e redução da dependência de conhecimento individual.

8. Desenho experimental e métricas

Dimensão	Métricas e evidências
Observações	Disponibilidade; cobertura; contagem por canal; taxas e motivos de rejeição; latência; duplicidades; distribuição por superfície e ângulo.
Ajuste ao modelo	Média, desvio-padrão, RMS e distribuição de O-B e O-A; redução de viés; consistência com erro prescrito; estatísticas por canal, região e regime.
Análise	Tamanho e estrutura dos incrementos; ajuste às radiâncias e a observações independentes; balanço e presença de artefatos.

Dimensão	Métricas e evidências
Previsão	RMSE, viés, correlação de anomalias e scores de precipitação; perfis e mapas por prazo; significância por bootstrap ou testes pareados adequados.
Ciclagem	Taxa de ciclos concluídos; estabilidade dos coeficientes de viés; deriva; falhas por componente; sensibilidade ao spin-up.
Computação	Tempo de processamento; custo por observação/canal; memória; volume de I/O; escalabilidade e efeito do thinning.
Software	Cobertura de casos críticos; testes aprovados; reprodutibilidade; revisão de código; documentação; número de falhas detectadas automaticamente.

A aceitação científica não será baseada apenas na redução global do RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio). Uma configuração deverá apresentar coerência física dos incrementos, estabilidade durante a ciclagem, neutralidade ou benefício em observações independentes e custo computacional justificável. Resultados negativos serão registrados, pois delimitam hipóteses e evitam sua repetição no sistema.

9. Plano de atividades e cronograma de 48 meses

Período	Foco	Principais atividades	Marcos e entregas
M1-M6	Capacitação, arquitetura do sistema e reprodução de casos	Capacitação nas componentes IODA, UFO e CRTM; recuperação da experiência anterior; inventário de sensores e dados; GeoVaLs; casos mínimos; HofX.	D1 plano de capacitação; D2 inventário; M1 caso HofX do instrumento inicial reproduzido pelo bolsista e por outro integrante.
M7-M12	Implementação do instrumento inicial selecionado	QC conservador; seleção inicial de canais; erros; correção de viés inicial; 3DVar/FGAT curto.	D3 cadeia v1; D4 referência inicial; M2 primeiro ciclo com o instrumento selecionado.
M13-M18	Robustez da configuração inicial	Experimentos por canal; superfície e ângulo; spin-up; automação de diagnósticos; revisão colaborativa.	D5 diagnósticos; M3 primeira configuração recomendada de radiancias.
M19-M24	Ciclos sazonais e consolidação do primeiro instrumento	Ciclos prolongados em estações contrastantes; verificação; otimização; artigo 1.	D6 avaliação anual; D7 manuscrito 1; M4 configuração do primeiro instrumento consolidada.
M25-M30	Expansão instrumental condicionada	Avaliação e incorporação de um segundo instrumento; conversores; coeficientes; canais; testes e HofX.	D8 decisão técnica; M5 novo sensor validado em HofX, quando viável.
M31-M36	Assimilação ampliada	Experimentos com sensor adicional, se aprovado; interação com híbrido; avaliação independente.	D9 configuração ampliada de referência, incorporando o instrumento adicional quando aprovado, ou relatório técnico de limitações; D10 artigo 2; M6 avaliação independente.
M37-M42	Pesquisa avançada condicionada	Radiancias sob nuvens/all sky, novos regimes ou outro tema definido conforme a maturidade alcançada.	D11 protótipo avançado ou relatório de viabilidade; M7 avaliação científica para decisão sobre continuidade.
M43-M48	Consolidação e transferência	Ciclos finais; documentação; treinamento; reprodução independente por integrantes que não desenvolveram diretamente a configuração.	D12 release; D13 manual; D14 relatório final; M8 transferência concluída.

10. Entregas verificáveis

ID	Entrega
E1	Inventário técnico de sensores, canais, formatos, coeficientes e requisitos de GeoVaLs.
E2	Conversores e validações de radiancias para IODA, acompanhados de testes.
E3	Caso HofX e 3DVar/FGAT de referência para o primeiro instrumento selecionado, com instruções de reprodução.
E4	Configurações versionadas de QC, thinning, erros e correção de viés.
E5	Pacote de diagnóstico por canal, sensor, região, superfície e condição de nuvem.
E6	Relatório de sensibilidade da configuração inicial às escolhas de instrumento, canais, controle de qualidade, erros observacionais, superfície e correção de viés.
E7	Primeira configuração de referência para assimilação em céu claro, avaliada em ciclos sazonais.
E8	Incorporação e avaliação de ao menos um segundo instrumento ou plataforma, condicionada à disponibilidade, à maturidade do sistema e à avaliação científica da etapa.
E9	Protótipo e avaliação de radiancias sob nuvens/all-sky, ou relatório técnico conclusivo que documente limitações e requisitos pendentes.

ID	Entrega
E10	Alterações de código integradas ao MONAN-JEDI e configurações, testes de execução, monitoramento e documentação integrados ao monan-jedi-workflow.
E11	Relatórios semestrais, apresentações internas, capacitação e transferência de conhecimento para integrantes do GAD.
E12	No mínimo dois manuscritos submetidos a periódicos ou conferências qualificadas e relatório técnico final.

11. Indicadores e critérios de êxito

- $\geq 95\%$ dos ciclos do experimento final concluídos sem intervenção manual por falha da cadeia de radiâncias;
- 100% das configurações recomendadas com versão, origem dos dados/coeficientes e caso mínimo de reprodução documentados;
- estatísticas O-B e O-A disponíveis por sensor e canal em todos os experimentos de assimilação;
- ausência de degradação estatisticamente robusta nas métricas prioritárias do controle e benefício demonstrado em pelo menos um conjunto independente de análise ou previsão;
- todas as funcionalidades incorporadas com revisão de código e testes compatíveis com a infraestrutura do projeto;
- realização de pelo menos um treinamento interno por ano a partir do segundo ano;
- **submissão de pelo menos dois trabalhos científicos** e entrega dos relatórios técnicos previstos.

12. Governança, integração e responsabilidades

O bolsista liderará a execução cotidiana da frente de radiâncias: implementação, experimentos, análise, documentação e comunicação dos resultados. O supervisor definirá prioridades, aprovará as bases de dados científicas e garantirá o alinhamento institucional. Decisões que exijam mudanças no código-fonte do MONAN-JEDI - como alterações nas variáveis de estado, nos GeoVaLs ou nas interfaces com o MONAN - serão discutidas com os responsáveis pelos componentes afetados. Da mesma forma, mudanças no monan-jedi-workflow que afetem a matriz B, as convenções das observações, a preparação dos dados, a execução dos ciclos ou as configurações de referência serão submetidas ao fluxo de revisão do GAD.

Ritmo	Finalidade
Semanal ou quinzenal	Acompanhamento técnico do bolsista com a supervisão, o pesquisador em formação e os responsáveis pelas interfaces.
Mensal	Apresentação breve ao GAD: avanços, falhas, próximos experimentos e decisões requeridas.
Semestral	Relatório com entregas, métricas, reprodutibilidade, riscos e revisão do cronograma.
Ao final de cada marco	Revisão de código e configuração, com reprodução independente por integrante que não tenha realizado o desenvolvimento principal.

13. Riscos e estratégias de mitigação

Risco	Efeito	Mitigação
Mudanças rápidas nas versões JEDI/CRTM/IODA	Quebra de interfaces ou configurações.	Versionamento explícito; branches de atualização; testes mínimos; upgrades em janelas planejadas.

Risco	Efeito	Mitigação
Ausência/inconsistência de GeoVaLs no MONAN	Impossibilidade ou viés na simulação.	Inventário precoce; testes de perfil; implementação coordenada com MPAS-JEDI/MONAN; priorização de canais compatíveis.
Dados ou coeficientes indisponíveis	Atraso de sensor planejado.	Prioridade flexível entre classes instrumentais; manutenção de cópias institucionais locais de dados e coeficientes, quando permitido pelas licenças e regras de distribuição; origem, versão e alternativas de obtenção documentadas.
Degradação da previsão	Impossibilidade de recomendar configuração.	Experimentos fatoriais; assimilação passiva; avaliação por canal; revisão de QC, erro, viés e superfície; resultado negativo documentado.
Custo computacional elevado	Ciclos inviáveis.	Thinning; seleção de canais; paralelização; análise de desempenho para identificação de gargalos; uso de conjuntos reduzidos durante o desenvolvimento e execução de ciclos completos apenas em etapas de avaliação.
Complexidade all-sky superior à maturidade do sistema	Entrega incompleta.	Avaliação de decisão no M36; protótipo condicionado; entrega alternativa obrigatória de diagnóstico e requisitos, preservando resultados úteis.
Concentração de conhecimento no bolsista ou em poucos integrantes	Risco de descontinuidade.	Trabalho em pares; participação contínua de pesquisador do quadro em formação; documentação; treinamentos; reprodução independente; código institucional.

14. Resultados e impactos esperados

- Capacidade institucional de assimilar radiâncias diretamente no MONAN-JEDI, com cadeia rastreável desde o dado bruto até a verificação.
- Melhor compreensão dos vieses do MONAN no espaço radiométrico e de sua dependência de canal, superfície, região e regime atmosférico.
- Configurações de referência cientificamente avaliadas para os instrumentos priorizados, incluindo ao menos uma expansão multissensor condicionada aos critérios de avanço do projeto.
- Redução do risco de degradações silenciosas por meio de monitoramento, testes e critérios formais de decisão.
- Código e documentação reutilizáveis por pesquisadores e equipes operacionais do CPTEC.
- Formação avançada do bolsista em assimilação de dados, transferência radiativa, *software* científico e avaliação de previsão.
- Produção científica conectada a uma entrega tecnológica concreta para o sistema nacional de previsão numérica do MONAN-JEDI.

15. Produtos de comunicação e disseminação

Os resultados serão divulgados em relatórios do Programa de Capacitação Institucional (PCI), seminários internos, documentação técnica, tutoriais reprodutíveis, apresentações em eventos científicos e artigos. A documentação de mudanças no código-fonte acompanhará o repositório MONAN-JEDI; a documentação de preparação, configuração, execução e diagnóstico acompanhará o repositório monan-jedi-workflow. Sempre que as licenças e as regras de colaboração permitirem, contribuições genéricas serão encaminhadas aos projetos JEDI, UFO, IODA ou MPAS-JEDI. As configurações e os dados institucionais permanecerão nos repositórios apropriados do INPE.

16. Infraestrutura e competências requeridas

O projeto utilizará o ambiente de computação de alto desempenho do INPE apoiado no supercomputador Jaci, o conjunto de programas e dependências do MONAN-JEDI, os repositórios institucionais e os conjuntos de observação disponíveis. A execução exigirá interação com especialistas em observações, modelo, método variacional, matriz B, fluxo de execução e avaliação. A supervisão será exercida por pesquisador do GAD. Pelo menos um integrante do quadro participará continuamente das decisões, revisões e reproduções dos experimentos, com o objetivo de adquirir as competências necessárias para assumir futuramente a responsabilidade pela área de radiancias. O bolsista não trabalhará de forma isolada e não será o único detentor do conhecimento produzido.

17. Modalidade da bolsa

Modalidade	Categoria/Nível	Duração	Valor	Quantidade
PCI-D	D-C	48 meses	R\$4.394,00	1 bolsa

18. Pontos de decisão e critérios de avanço

Pontos de Decisão	Momento	Decisão baseada em evidência
G1 - Prontidão técnica	M6	Dados IODA, coeficientes, GeoVaLs e HofX reproduzíveis; autoriza primeira assimilação.
G2 - Segurança científica	M12	QC, vies e incrementos coerentes; autoriza ciclos prolongados.
G3 - Baseline consolidado	M24	Impacto em períodos independentes, custo e estabilidade; define a primeira configuração de referência.
G4 - Expansão	M30	Disponibilidade, informação e custo do novo sensor; autoriza assimilação multi-instrumento.
G5 - All-sky	M36	Maturidade de variáveis, operador, QC e diagnósticos; autoriza protótipo avançado ou ativa entrega alternativa.
G6 - Transferência	M46	Testes, documentação, reprodução independente e métricas; autoriza release candidate.

19. Síntese da contribuição do bolsista

Ao final dos 48 meses, espera-se que o bolsista, em colaboração com a supervisão, um pesquisador do quadro em formação e os demais integrantes do GAD, tenha contribuído para consolidar uma área de assimilação de radiancias reproduzível, testada e documentada no MONAN-JEDI. A entrega será avaliada pela existência de código revisado, configurações versionadas, diagnósticos compreensíveis, resultados científicos, mais de um instrumento avaliado e conhecimento efetivamente transferido. Ao menos um integrante do quadro deverá estar preparado para coordenar a continuidade técnica da área, apoiado por documentação e por uma equipe capaz de reproduzir os principais processos.

20. Referências essenciais

- [Bormann, N.; Bauer, P. \(2010\). Estimates of spatial and interchannel observation-error characteristics for current sounder radiances for NWP. Part I. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136, 1036–1050.](#)

- [Cucurull, L. et al. \(2014\). Impact of infrared, microwave, and radio occultation satellite observations on operational numerical weather prediction. Monthly Weather Review, 142, 4164–4186.](#)
- [Dee, D. P.; Uppala, S. \(2009\). Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 135, 1830–1841.](#)
- [Derber, J. C.; Wu, W.-S. \(1998\). The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. Monthly Weather Review, 126, 2287–2299.](#)
- [Duncan, D. I. et al. \(2022\). Assimilation of AMSU-A in all-sky conditions. Monthly Weather Review.](#)
- [Duruissseau, F. et al. \(2022\). Assimilation of satellite data in numerical weather prediction. Part II: Recent years. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.](#)
- [Eyre, J. R. et al. \(1993\). Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 119, 1427–1463.](#)
- [Geer, A. J.; Bauer, P. \(2011\). Observation errors in all-sky data assimilation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 2024–2037.](#)
- [Geer, A. J. et al. \(2018\). All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144, 1191–1217.](#)
- [Rodgers, C. D. \(2000\). Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. World Scientific.](#)

20.1 Fontes institucionais e documentação técnica

- [NOAA/NESDIS \(2025\). Suspension of POES data and decommissioning of NOAA-15, NOAA-18 and NOAA-19.](#)
- [WMO OSCAR \(2024, consultado em setembro de 2026\). AMSU-A instrument and platform status.](#)
- [NWP SAF \(2026\). Local and global AMSU-A data intercomparison and channel-status monitoring.](#)
- [ESA \(2026\). MetOp-SG instrument package — Microwave Sounder \(MWS\).](#)
- [JCSDA. JEDI Documentation — Observation Operators in UFO.](#)
- [JCSDA. JEDI Documentation — Variational Bias Correction in UFO.](#)
- [JCSDA. JEDI Documentation — MPAS-JEDI test files and example applications.](#)
- [JCSDA. IODA data conventions — Objects and Layouts.](#)
- [JCSDA. Community Radiative Transfer Model — CRTM repository and releases.](#)

Nota de atualização: o estado das plataformas e dos canais deverá ser verificado novamente na implantação e antes de cada período experimental. A bibliografia científica será ampliada conforme os sensores e métodos efetivamente selecionados.