

## **CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA ESPACIAL**

### **Coordenador Acadêmico**

Lívia Ribeiro Alves

### **Vice-Coordenador Acadêmico**

Marlos Rothenbach da Silva

### **Docentes Permanentes**

Alexandre Alvares Pimenta, Doutor, INPE, 2002- FISAT

Alisson Dal Lago, Doutor, INPE, 2003- MAGHEL

Antonio Lopes Padilha, Doutor, USP, 1989 - GEOMA

Clezio Marcos De Nardin, Doutor, INPE, 2003 - IONO

Cristiano Max Wrasse, Doutor, INPE, 2004 - LUME

Eliah Fernanda de Maria de São Sabbas Tavares, Ph.D., Alaska Univ., 2003 - LUME

Delano Gobbi, Doutor, INPE, 1993- LUME

Érico Luiz Rempel, Ph.D., Universidade de Cambridge, Reino Unido, 2009

Esfhan Alam Kherani, Ph.D., Physical Research Laboratory, Índia, 2002 – IONO

Eurico Rodrigues de Paula, Doutor, INPE, 1986 - IONO

Ezequiel Echer, Doutor, INPE, 2004 - MAGHEL

Fábio Becker Guedes, Ph.D., USP, São Carlos, 2001 - IONO

Flávia Reis Cardoso Rojas, Doutora, INPE, 2010

Hisao Takahashi, Doutor, INPE, 1980- LUME

Inez Staciarini Batista, Doutora, INPE, 1985- IONO

Jonas Rodrigues de Souza, Doutor, INPE, 1997- IONO

José Humberto Andrade Sobral, Ph.D., Cornell Univ., 1973 - IONO

Kleber Pinheiro Naccarato, Doutor, INPE, 2007 – ELAT

Lívia Ribeiro Alves, Doutora, INPE, 2011 - GEOMA

Luis Eduardo Antunes Vieira, Doutor, INPE, 2002 - MAGHEL

Marcelo Magalhães Fares Saba, Doutor, INPE, 1997- ELAT

Maria Paulete Pereira Martins, Doutora, INPE, 1996 - FISAT

Maria Virgínia Alves, Doutora, INPE, 1990 - MAGHEL

Marlos Rothenbach da Silva, Doutor, INPE, 2009 - MAGHEL

Odim Mendes Júnior, Doutor, INPE, 1992 - MAGHEL

Osmar Pinto Júnior, Doutor, INPE, 1984 - ELAT

Paulo Prado Batista, Doutor, INPE, 1983 - FISAT

Plínio Carlos Alvalá, Doutor, INPE, 1995 - QUIATM

Walter D. Gonzalez Alarcon, Ph.D., Univ. Cal. Berkeley, 1973 - MAGHEL

### **Docentes Colaboradores**

Alícia Luiza Clua de Gonzalez Alarcon, Doutora, Univ. La Plata, 1973 - MAGHEL

Andreia Santos Matos, Doutor, UNB, 2012 – GEOMA

Iara Regina Cardoso de Almeida Pinto, Doutora, INPE, 1987 - ELAT

Ivan Jelinek Kantor, Ph.D., Rice Univ., 1973 - IONO

Mangalathayil Ali Abdu, Ph.D., Gujarat Univ., 1967 - IONO

Polinaya Muralikrishna, Ph.D., Gujarat Univ., 1975 - IONO

Severino Luiz Guimarães Dutra, Doutor, INPE, 1982- GEOMA

## **CURSO DE GEOFÍSICA ESPACIAL**

### **Programação anual para o Mestrado:**

**\*1-Área de Concentração em Ciências do Ambiente Solar-Terrestre - AST**

**\*2-Área de Concentração em Ciências Atmosféricas - ATM**

### **1º Período**

#### **Obrigatórias para as duas Áreas**

GES-200-4 Geofísica Espacial \*

GES-203-1 Instrumentação de Geofísica Espacial\*

GES-207-4 Métodos Matemáticos da Física

GES-502-0 Seminário de Geofísica Espacial I

### **2º Período**

#### **Obrigatórias**

GES-205-4 Eletrodinâmica I

GES-300-4 Física Solar-Terrestre\* (Área 1)

GES-305-4 Física da Atmosfera\* (Área 2)

### **3º Período**

Para as duas Áreas

**Deverão ser cursadas duas disciplinas dentre as disciplinas eletivas**

**Eletiva - Na área de escolha do aluno**

**Obrigatórias para o Doutorado**

GES-503-0 Seminário de Geofísica Espacial II

#### **Eletivas para o Mestrado e Doutorado**

GES-208-3 Métodos Estatísticos em Geofísica

GES-301-4 Geomagnetismo

GES-204-4 Física de Plasma I

GES-307-4 Aeronomia

GES-302-4 Indução Eletromagnética Terrestre

GES-303-4 Luminescência Atmosférica

GES-304-4 Física de Plasma II

GES-306-4 Análise de Sinais Aleatórios

GES-313-4 Química da Atmosfera

GES-314-4 Eletricidade Atmosférica

GES-315-4 Eletrodinâmica Atmosférica

GES-316-4 Simulação Numérica de Fenômenos de Plasmas Espaciais

GES-401-4 Física da Ionosfera

GES-402-4 Dinâmica da Alta Atmosfera

GES-403-4 Física da Plasmasfera e Cinturões de Radiação

GES-404-4 Processos não Lineares de Plasma

GES-405-4 Física da Magnetosfera Externa

GES-408-4 Física das Descargas Atmosféricas

GES-409-4 Tópicos Especiais em Alta Atmosfera

GES-410-4 Tópicos Especiais em Eletricidade Atmosférica

GES-411-4 Tópicos Especiais em Geomagnetismo

GES-412-4 Tópicos Especiais em Ionosfera

GES-413-4 Tópicos Especiais em Luminescência Atmosférica

GES-414-4 Tópicos Especiais em Magnetosfera-Heliosfera

GES-415-4 Tópicos Especiais em Média e Baixa Atmosfera

GES-416-4 Tópicos Especiais em Acoplamento Eletrodinâmico Atmosférico e Espacial

**\* Obrigatórias para doutorandos que não as tenham cursado.**

**EMENTAS DAS DISCIPLINAS DO  
CURSO DE GEOFÍSICA ESPACIAL**

**1º PERÍODO LETIVO**

**GES-200-4 Geofísica Espacial**

Obrigatória

Conceitos de ambiente espacial, de clima e tempo espaciais. Influências no Espaço Próximo, na atmosfera e na litosfera. A fonte solar, radiação eletromagnética e matéria corpuscular. Sol calmo e Sol ativo. Atmosfera: origem, evolução e constituição. Radiação, temperatura e ventos. Formação de nuvens. Eletrificação da atmosfera: processos de eletrificação de nuvens, descargas elétricas atmosféricas, Eventos Luminosos Transientes – ELTs (sprites, halos, jatos, elves), Emissões de Alta Energia de Tempestades (raios X, raios gama, pares elétron-pósitron, nêutrons). Circuito Elétrico Atmosférico Global e acoplamento atmosfera-espaço próximo à Terra (ionosfera e magnetosfera). Ionosfera: Ionização, formação das camadas ionizadas, processos de transporte, campos elétricos, correntes, interferência em sinais eletromagnéticos. Fotoquímica e luminescência atmosférica. Magnetosfera e meio Interplanetário: campo magnético intrínseco, sistemas de correntes magnetosféricas, acoplamento Sol-Terra, fenômenos interplanetários, perturbações magnéticas, ondas de plasma. Introdução a atmosferas em outros planetas.

**Bibliografia**

- CAMPBELL, W. H. Introduction to geomagnetic fields. Cambridge, Cambridge University, 1997.290p.
- GOODY, R. M.; WALKER, J. C. G. Atmosferas planetárias. São Paulo, Edgar Blucher, 1975. 140p. (Série de textos básicos de Geociências).
- FÜLLEKRUG, M.; MAREEV, E. A.; RYCROFT, M. J. “Sprites, elves and intense lightning discharges”, Springer, 2006.
- HAYMES, R. C. Introduction to space science. New York, John Wiley & Sons, 1971. 555p. (Space science text series).
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. Introdução à Geofísica Espacial. São Paulo, Edusp, 1991.
- KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. Introduction to space physics. Cambridge, Cambridge University, 1995. 568p.
- LUTDGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. The atmosphere. New Jersey, Prentice-Hall, 1998. 434p.
- Magono, C. Thunderstorms. Amsterdam, Elsevier, 1980.
- SALBY, M. L. Fundamentals of atmospheric physics. California, Academic Press, 1996. 627p.
- PARKS, G. R. Physics of space plasmas: an introduction. California, Addison-Wesley, 1991. 538p.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Lightning Physics and Effects, 2003. Ed. Cambridge Univ. Press.
- VOLLAND, H. Handbook of Atmospheric Electrodynamics. Boca Raton, CRC-Press, Vol. 1 e 2, 1995. 408p.

**GES-203- 1 Instrumentação de Geofísica Espacial**

Obrigatória

Introdução teórica e prática da aparelhagem e metodologia científica de Ciência Espacial em operação no INPE: Fotômetros, Radar de Laser, Espectrofotômetros Dobson, Medidores de Ozônio, Magnetômetros, Receptores de VLF, Polarímetros VHF, Riômetros, Ionossondas, cargas úteis (fotômetros, experimentos de plasma ionosférico) a bordo de foguetes, espectroscopia nuclear, medidores de campo elétrico, detectores de partículas (raios-X, raios gama, nêutrons, pares elétron-pósitrons), câmeras CCD de diversas taxas de aquisição de imagens e sensibilidade luminosa para observação de aeroluminescência, relâmpagos e Eventos Luminosos Transientes – ELTs (sprites, halos, jatos e elves) e ondas ELF na Atmosfera, instrumentação para simulação de plasmas espaciais. É necessário a apresentação de um trabalho de revisão atualizado sobre um dos instrumentos apresentados.

## **Bibliografia**

FÜLLEKRUG, M.; MAREEV, E. A.; RYCROFT, M. J. "Sprites, elves and intense lightning discharges", Springer, 2006  
KIRCHHOFF, V.W.J.H. Elementos básicos sobre fotômetros de filtro inclinável. INPE-3124-MD/026, maio, 1984.  
KIRCHHOFF, V.W.J.H. Elementos básicos sobre o Radar de Laser. São José dos Campos, INPE maio 1984 (INPE-3123-MD/025).  
NORDEMANN, D.J.R.; PEREIRA, E.B. Elementos básicos de geofísica nuclear. São José dos Campos, INPE fev. 1984.(INPE-3002-PRE/452).  
RAKOV, V. A. "Fundamentals of Lightning", Cambridge Univ. Press, 2016  
RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Lightning Physics and Effects, 2003. Ed. Cambridge Univ. Press.

## **GES-207 - 4 Métodos Matemáticos da Física I**

Obrigatória

Espaços lineares: operadores lineares, vetores, álgebra vetorial, gradiente, divergência, rotacional e laplaciano, aplicações na Física, matrizes, tensores, transformação de base vetorial, espaço dual, problemas de autovalor, diagonalização de matrizes, espaço de Hilbert. Funções de variável complexa: funções analíticas, combinação analítica, singularidades, resíduos, teorema dos resíduos, integração de funções unívocas, pólos sobre contorno, superfície de Riemann, integração de funções plurívocas. Equações diferenciais: equação diferencial linear com coeficientes constantes, equação diferencial linear com coeficientes variáveis, equações diferenciais lineares de Euler, solução de equações diferenciais lineares em série de potências, equação indicial, equações diferenciais conhecidas na Física. Funções Especiais: polinômio de Legendre, funções de Bessel, polinômios de Hermite. Transformadas Integrais: transformadas de Fourier, Fourier Seno e Fourier Cosseno, transformada de Laplace, teoremas de convolução. Equações diferenciais parciais: a) Classificação, equações de Navier-Stokes, de onda, de difusão e de Maxwell; b) Método da característica.

## **Bibliografia**

BYRON JR., F. W.; FULLER, R. W. Mathematics of Classical and Quantum Physics. Reading, MA, Addison-Wesley, 1970.

MACHADO, K. D. Equações diferenciais aplicadas à Física, Editora UEPG, 1990.

MEDRANO-B., R.A. Transformadas Integrais. São José dos Campos, INPE, abril, 1989. (INPE-4807-MD/40).

MEDRANO-B., R.A. Equações diferenciais ordinárias. São José dos Campos, INPE, maio, 1980. (INPE-1753-RPE/144).

MEDRANO-B., R.A. Campos vetoriais, espaços lineares e tensores na física. São José dos Campos, Transtec, 1994.

MEDRANO-B., R.A. Funções de variáveis complexas. São José dos Campos, INPE, maio 1979. (INPE-1494-RPE/038).

MEDRANO-B., R.A. Funções especiais. São José dos Campos, INPE, fev. 1985. (INPE-3479-RPE/472).

OCKENDON, J. R. , S. D. HOWISON, A. A. LACEY, A. B. MOVCHAN, Applied partial differential equations, Oxford Press, 2003.

### **GES-502 - 0 Seminário de Geofísica Espacial I**

Obrigatória para o Mestrado

Os seminários são quinzenais e abordam tópicos de pesquisas atuais, relacionados com a área de Geofísica Espacial.

### **GES-503 – 0 Seminário de Geofísica Espacial II**

Obrigatória para o Doutorado

Os seminários são quinzenais e abordam tópicos de pesquisas atuais, relacionados com a área de Geofísica Espacial.

## **EMENTAS DAS DISCIPLINAS DO CURSO DE GEOFÍSICA ESPACIAL 2º PERÍODO LETIVO**

### **GES-205 – 4 Eletrodinâmica I**

Obrigatória

Eletrostática: Campo Elétrico, Leis de Coulomb e de Gauss, Rotacional do Campo Elétrico, Potencial Elétrico, Trabalho e Energia, Condutores, Equações de Laplace e Poisson, Método das Imagens, Dipolo Elétrico, Campos Elétricos na matéria, Polarização, Deslocamento Elétrico, Dielétricos Lineares. Magnetostática: Força de Lorentz, Lei de Biot-Savart e de Ampere, Divergência e Rotacional do Campo Magnético, Potencial vetor Magnético, Dipolo Magnético, Campos Magnéticos na matéria, Magnetização, Campo de um objeto magnetizado, Campo auxiliar H. Eletrodinâmica: Lei de Ohm, Força Eletrodinâmica, Lei de Faraday, Indução Eletromagnética, Equações de Maxwell no vácuo e na matéria, Lei de conservação de carga.

#### **Bibliografia**

COOK, D.M. The Theory of the Electromagnetic Field. New York, Prentice-Hall, 1975.

GRIFFITHS, David J. *Introduction to Electrodynamics* (4th ed.). Cambridge University Press, 2017.

JACKSON, J.D. Classical Electrodynamics. 3rd ed. New York, NY, Wiley, 1999.

LORRAIN, P.; CORSON, D.R. Eletromagnetic Fields and Waves. San Francisco, Freeman, 1970.

PANOFSKY, W.H.H.; PHILLIPS, M. Classical Electricity and Magnetism, Reading, MA, Addison Wesley, 1962

REITZ, J.R.; MILFORD, F.J.; CHRISTY, R.W. Fundamentos da Teoria Eletromagnética. Rio de Janeiro, RJ, Campus, 1982.

### **GES-208-3 Métodos Estatísticos em Geofísica**

Obrigatória

Introdução à análise de dados. Noções de Probabilidade e Estatística. Propagação de Erros. Variáveis aleatórias discretas e contínuas. Distribuições probabilísticas. Amostragem. Inferência estatística. Teste de hipóteses. Tópicos especiais: comparação de duas médias, testes para variância, regressão linear.

#### **Bibliografia**

BEVINGTON, P. R., Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, McGraw-Hill Company, Inc. New York, 1969.

BUSSAB, W. O. E P. A. MORETTIN, Estatística Básica, Métodos Quantitativos, Atual Editora, S. Paulo, 1987.

HOEL, P. G., Introduction to Mathematical Statistics, John Wiley & Sons, New York, 1962.

JENKINS, G. M. AND D. G. WATTS, Spectral Analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 1968.

MAGALHÃES, M. N. E A. C. P. DE LIMA, Noções de Probabilidade e Estatística, 3a Edição, IME – USP, São Paulo, 2001.

MEYER, P. L., Probabilidade, Aplicações a Estatística, 2a. Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1983.

PRESS, W. H., B. P. FLANNERY, S. A. TEUKOLSKY, AND W. T. VETTERLING, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 2nd. ed., 2002.

### **GES-300-4 Física Solar-Terrestre**

Obrigatória Área 1

Conceitos básicos de plasmas espaciais. Origem e evolução do campo geomagnético. Anomalia magnética do Atlântico Sul. Conceitos da física solar, atividade solar, vento solar e do meio interplanetário. Magnetosferas planetárias. Regiões da magnetosfera. Processos físicos e químicos da ionosfera. Raios cósmicos. Acoplamento sol-magnetosfera-ionosfera-atmosfera. Acoplamento atmosfera-ionosfera-magnetosfera. Atividades geomagnéticas, tempestades e subtempestades geomagnéticas.



## **Bibliografia:**

FÜLLEKRUG, M.; MAREEV, E. A.; RYCROFT, M. J. "Sprites, elves and intense lightning discharges", Springer, 2006

HARGREAVES, J. K. The solar-terrestrial environment. Cambridge, Cambridge University, 1992. 420p. (Cambridge atmospheric and space science series).

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. Introduction to space physics. Cambridge, Cambridge University, 1995. 568p.

LYONS, L. R.; WILLIAMS, D. J. Quantitative aspects of magnetospheric Physics. Boston, Reidel, 1984.

MERRIL, R. T.; MCELHINNY, M. W. The Earth's magnetic field: its history, origin and planetary perspective. London, Academic Press, 1983.

PARKISON, W. D. Introduction to geomagnetism. Edinburgh, Scottish Academic Press, 1983.

PARKS, G. R. Physics of space plasmas: an introduction. California, Addison-Wesley, 1991. 538p.

VOLLAND, H. Atmospheric electrodynamics. New York, Springer-Verlag, (Physics and Chemistry in Space), 1984. 105p.

BAUMJOHAN, W.; TREUMAN, R. A. Basic Space Plasma Physics, London, Imperial College, 2004. 329p.

## **GES-305-4 Física da Atmosfera**

### Obrigatória Área 2

Atmosfera: Composição da atmosfera. Estrutura térmica. Equilíbrio hidrostático. Equações que regem o estado da atmosfera. Modelo unidimensional. Estabilidade atmosférica. Desvios do equilíbrio: balanço geostrófico, ventos médios, ondas atmosféricas.

Aeroluminescência: Processos químicos e iônicos. Difusão molecular e turbulenta. Elementos de cinética química. Composição e distribuição das espécies químicas. Formação de camadas. Reações quimioluminescentes. A aeroluminescência do O, O<sub>2</sub>, OH e Na. Radiação: princípios fundamentais, espectro eletromagnético, processos radiativos. Leis fundamentais. Transferência Radiativa.

Eletricidade Atmosférica: Circuito elétrico atmosférico global. Interconexão elétrica entre baixa e alta atmosférica. Formação e processos de eletrificação em nuvens de tempestade. Descargas atmosféricas. Eventos Luminosos Transientes – ELTs (sprites, halos, jatos azuis, jatos gigantes, elves). Emissões de Alta Energia de Tempestades - ALETs (raios X, raios gama, pares elétron-pósitron, nêutrons). Sistemas de observação (aqui eu tinha colocado um detalhamento, seguindo o que tinha antes, que era "sistemas de monitoramento", mas acho que dizer simplesmente Sistemas de observação, se você preferir ser mais sucinta, também fica bom pois isso inclui tudo. Caso deseje detalhar, a sugestão que eu tinha dado era: Sistemas de monitoramento, observação e detecção de partículas).

## **Bibliografia:**

- BETZ, H.D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. "Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research", Springer, 2009
- BRASSEUR, G.; SOLOMON, S. Aeronomy of the Middle Atmosphere, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1986, 452p.
- COORAY, V. "An Introduction to Lightning", Springer, 2015
- FÜLLEKRUG, M.; MAREEV, E. A.; RYCROFT, M. J. "Sprites, elves and intense lightning discharges", Springer, 2006
- JOHNSON, J. C. Physycal Meteorology. Massachusetts Institute of Tecnology, Cambridge, 1963, 393p.
- KIRCHHOFF, V. W. H. Introdução a Geofísica Espacial, Ed. Universidade de São Paulo, SP, 1991,149p.
- MACGORMAN, D. R.; Rust, W. D. "The Electrical Nature of Storms", Oxford Univ. Press, 1998
- NRC, "Studies in Geophysics: The Earth's Electrical Environment", National Academy Press, 1986
- RAKOV, V. A. "Fundamentals of Lightning", Cambridge Univ. Press, 2016
- REES, M. H. Physics and Chemistry of the Upper atmosphere, Cambridge atmospheric and Space Science Series, 1989, 289p.
- SALBY, M. L. Fundamentals of Atmospheric Physics. Academic Press, London, 1996. 627p.
- FLEAGE, R. G. Introduction to Atmospheric Physics. Academic Press, New York, 1963. 346p.
- VAREJA-SILVA, M. A., Meteorologia e Climatologia.. INMET, Brasília, 2000,532p.
- VIANELLO, R. L.; RAINIER ALVES, A., Meteorologia Básica e Aplicações. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991, 449p.

## **EMENTAS DAS DISCIPLINAS DO CURSO DE GEOFÍSICA ESPACIAL 3º PERÍODO LETIVO**

**Mestrado: Deverão ser cursadas duas disciplinas dentre as disciplinas eletivas**

## **EMENTAS DAS DISCIPLINAS DO CURSO DE GEOFÍSICA ESPACIAL ELETIVAS PARA O MESTRADO E DOUTORADO**

### **GES-408-4 Física das Descargas Atmosféricas**

Introdução: tipos de descargas segundo a direção de propagação e polaridade. Iniciação e formação da descarga atmosférica. Descargas corona, "streamers" e líderes. A teoria do líder bidirecional bipolar. O desenvolvimento do líder positivo e negativo. Diferenças entre raios positivos, negativos e bipolares. Processos físicos envolvidos na formação dos raios: pulsos de quebra de rigidez do ar, líder escalonado, líder conectivo e processo de conexão com estruturas no solo, descarga de retorno, corrente contínua e componentes-M, estabilidade do canal do raio, líderes de recuo e descargas subseqüentes. Raios ascendentes e raios induzidos: iniciação e processos físicos.

#### **Bibliografia:**

- COORAY, V. The Lightning Flash, 2<sup>nd</sup> Edition, IET, 2014.
- COORAY, V. An Introduction to Lightning, Springer, 2015.

COORAY, V. Lightning Protection, Springer, 2015.  
MAZUR, V. Principle of Lightning Physics, IOP, 2016.  
RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Lightning Physics and Effects, 2003. Ed. Cambridge Univ. Press.  
RAKOV, V. A. et al. Lightning Parameters for Engineering Applications, 2013. CIGRE.  
RAKOV, V. A. Fundamentals of Lightning, 2016. Ed. Cambridge Univ. Press.

### **GES-204-4 Física de Plasma I**

Conceitos fundamentais de plasma. Teoria orbital e invariantes adiabáticos. Teoria magnetohidro-dinâmica. Teoria cinética. Conceitos fundamentais de ondas e instabilidades em plasma.

### **Bibliografia**

BAUMJOHANN, W. & R. TREUMANN Basic Space Plasma Physics, Contemporary Physics  
Volume 54, Issue 3, 2013  
BELLAN, P. M. Fundamentals of Plasma Physics, Cambridge Univ. Press, 2006  
BITTENCOURT, J.A. Fundamentals of Plasma Physics. Oxford, Pergamon, 1986.  
BOYD, T.J.M. & J. J. SANDERSON The Physics of Plasmas, Cambridge Univ. Press, 2003  
CALLEN, J.D. Fundamentals of Plasma Physics, University of Wisconsin, 2006  
CHEN, F.F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. New York, Plenum, 1984. vol.1  
GOEDBLOED, J. P. & S. POEDTS, Principles of Magnetohydrodynamics: With Applications to Laboratory and Astrophysical Plasmas, Cambridge University Press, 2004 – 613p  
GOLDSTON, R. J. & P. H. RUTHERFORD, Introduction to plasma physics, IOP Publishing LTD, 1995  
GURNETT, D. A. & A. BHATTACHARJEE Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications, Cambridge University Press, 2005  
KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. Introduction to space physics. Cambridge, Cambridge University, 1995. 568p.  
KRALL, N. & A.W.TRAVELPIECE Principles of Plasma Physics, McGraw-Hill, 1973, 674p  
SCHUNK, R. & A. NAGY Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press, 2009  
PARKS, G.K. Physics of Space Plasmas: an Introduction. Redwood City, California, Addison-Wesley, 1991.  
PIEL, A. Plasma Physics: An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas, Springer, Germany, 2010  
PRIEST, E. Magneto hydrodynamics of the sun, Cambridge University Press, 2014

### **GES-307- 4 Aeronomia**

A atmosfera neutra: Estrutura térmica; Absorção de radiação solar; Equações primitivas; Ventos médios; Ondas atmosféricas; Difusão molecular e turbulenta; Elementos de cinética química; Composição e distribuição das espécies químicas; Aeroluminescência; Entrada de energia da magnetosfera.

A atmosfera ionizada: A formação da ionosfera (teoria da camada de Chapman); Processos fotoquímicos e de transporte (difusão ambipolar); Regiões ionosféricas D, E, F1 e F2; Exosfera; Aeroluminescência; Variações diurnas e noturnas; Fundamentos de geomagnetismo; Mobilidade e condutividade elétrica; Sistemas de correntes

elétricas; Fenômenos em média e baixa latitudes (anomalias, tempestades e irregularidades); Fenômenos em altas latitudes (tempestades, polar cap, aurora); Princípios de rádio propagação.

### **Bibliografia**

GUY BRASSEUR; SUSAN SOLOMON. *Aeronomy of the Middle Atmosphere*, Kluwer Academic Publishers, 1987.

JOHN KEITH HARGREAVES. *The Solar-Terrestrial Environment : An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere*, Cambridge University Press, 1995.

M. H. REES. *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*, Cambridge University Press, 1989.

JOSEPH W. CHAMBERLAIN. *Physics of the Aurora and Airglow*, American Geophysical Union, 1995.

H. RISHBETH; O. K. GARRIOTT. *Introduction to Ionospheric Physics*, Academic Press Inc., 1969.

MICHAEL C. KELLEY. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic Press Inc., 1989.

EARL E GOSSARD; WILLIAM H. HOOKE. *Waves in the atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves - their generation and propagation*, Elsevier Scientific Pub. Co., 1975.

### **GES-301-4 Geomagnetismo**

Introdução e história. Origem do campo geomagnético principal. Variação secular. Noções sobre paleomagnetismo. Variação  $S_q$  e  $L$ . Correntes ionosféricas. Variações geomagnéticas em baixas, médias e altas latitudes. Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Índices de atividade magnética. Representação do campo geomagnético em harmônicos esféricos. Magnetosfera e vento solar. Tempestades magnéticas. Variações rápidas do campo geomagnético. Pulsações geomagnéticas. Coordenadas B-L. Cinturões de radiação de Van Allen. Invariantes adiabáticos. Radiação eletromagnética terrestre (VLF, "Whistlers" etc.). Radiação eletromagnética terrestre. Correntes induzidas (eddy currents), condutividade.

### **Bibliografia**

AKASOFU, S.; CHAPMAN, S. *Solar Terrestrial Physics*. Oxford, Oxford University Press, 1972.

CHAPMAN, S.; BARTELS, J. *Geomagnetism*. Oxford, Clarendon Press, vols. 1–2, 1962.

JACOBS, J.A. (ed.) *Geomagnetism*. London, Academic Press, vols. 1–4, 1987–1991.

MERRIL, R.T.; MCELHINNY, M.W. *The Earth's Magnetic Field: Its History, Origin and Planetary Perspective*. London, Academic Press, 1983.

PARKINSON, W.D. *Introduction to Geomagnetism*. Edinburgh, Scottish Academic Press, 1983.

### **GES-302-4 Indução Eletromagnética Terrestre**

Métodos eletromagnéticos (EM): visão geral. Resistividade elétrica de rochas e minerais. Teoria da propagação de campos EM na Terra. Método magnetotélúrico (MT). Teoria MT para uma Terra unidimensional. Teoria MT para uma Terra bidimensional. Técnicas de campo. Origem dos sinais. Análise de séries temporais. Processamento e modelagem. Aplicações geofísicas.

## **Bibliografia**

BERDICHEVSKY M.N.; DMITRIEV, V.I. Models and Methods of Magnetotellurics. Berlin, Springer, 2008.

CHAVE, A.D.; JONES, A.J. (EDS.) The Magnetotelluric Method: Theory and Practice. Cambridge, 2012.

SIMPSON, F.; BAHR, K. Practical Magnetotellurics. Cambridge, 2005.

## **GES-303-4 Luminescência Atmosférica**

Conceitos básicos sobre o fenômeno de luminescência atmosférica. Sua história e primeiras observações. As emissões atmosféricas em geral. Os mecanismos de excitação e perda de energia nos processos fotoquímicos envolvidos na luminescência. Variações noturnas e sazonais. Variações espaciais e as propagações de ondas de gravidade. Temperaturas e ventos calculados pelos espectros da luminescência. Instrumentação: fotômetros e espectrômetros. Tópicos atuais.

## **Bibliografia**

ROACH, F.E. The Light of the Night Sky. D. Reidel, 1973.

CHAMBERLAIN, J.W. Physics of the Aurora and Airglow. New York, Academic, 1961.

McCORMAC, B.M. Aurora and Airglow. Londres, Reinhold, 1967.

REES, M.H. Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere. Cambridge University Press, 1989.

## **GES-304-4 Física de Plasma II**

Pré-requisito: GES-204-4

Ondas MHD. Ondas em plasmas mornos. Ondas em plasmas quentes. Interações entre partículas carregadas. Equilíbrio e estabilidade. Amortecimento de Landau. Equações de Boltzmann e de Fokker-Planck. Fenômenos de transporte em plasmas.

## **Bibliografia**

BITTENCOURT, J.A. Fundamentals of Plasma Physics. Oxford, Pergamon Press, 1986.

KRALL, N.A.; TRIVELPIECE, A.W. Principles of Plasma Physics. New York, McGraw-Hill, 1973.

SCHMIDT, G. Physics of High Temperature Plasmas. New York, Academic, 1979.

## **GES-306-4 Análise de Sinais Aleatórios**

Pré-requisito: GES-208-3

Dados determinísticos e aleatórios. Introdução a séries temporais. Análise de Fourier. Transformada de Fourier. Sistemas lineares e convolução. Filtros digitais. Processos estocásticos. Funções de auto-covariância e auto-correlação. Introdução à análise espectral. Noções sobre processamento de sinais por Ondeletras

## **Bibliografia**

BENDAT, J. S. AND A. G. PIERSOL. Random Data: Analysis and measurement Procedures, Wiley-Interscience, New York, 1971.

DAUBECHIES, I., TEN. Lectures on Wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1992.

JENKINS, G. M. AND D. G. WATTS. Spectral Analysis and its applications, Holden-Day, San Francisco, 1968.

KING, R., Digital Filtering in One and Two Dimensions: Design and Applications, Plenum Publishing Corporation, 1989.

MALLAT, S. A Wavelet tour of Signal Processing, Academic Press, San Diego, 1998.

### **GES-313-4 Química da Atmosfera**

Introdução: atmosfera, oceano, terra sólida. Descrição geral da atmosfera; camadas, regiões, extensões. Radiação solar: espectro, características de emissão do sol e absorção na Terra, efeito estufa. Química da atmosfera: processos de produção e perda; constituintes minoritários; diferenças na alta e baixa atmosfera. Ciclos de constituintes majoritários: O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>. Ciclos de constituintes minoritários. Óxidos de N, H e S. Fotoquímica do ozônio: estratosfera e troposfera: ação de nitrogenados e hidrogenados. Efeitos poluentes e sua ação sobre o ozônio.

#### **Bibliografia**

KIRCHHOFF, V.W.J.H. Química da atmosfera. São José dos Campos, INPE, 1984. (INPE-3190-PRE/554).

### **GES-314-4 Eletricidade Atmosférica**

Processos de ionização da atmosfera: camadas de absorção da radiação solar. Circuito elétrico atmosférico global: modelos DC e AC, ressonância Schumann. Interconexão elétrica entre baixa e alta atmosférica: Eventos Luminosos Transientes – ELTs (sprites, halos jatos azuis, jatos gigantes, elves), precipitação de partículas, Emissões de Alta Energia de Tempestades – ALETs (Raios-X, Raios Gama, Pares Elétron-Pósitron, Nêutrons). Formação das nuvens: circulação atmosférica global, termodinâmica atmosférica, microfísica de nuvens, efeito dos aerossóis. Processos de eletrificação em nuvens de tempestade: modelos indutivos, não-indutivos, colisionais e gravitacionais. Sistemas observacionais: campo eletrostático atmosférico, sensores de descargas atmosféricas, câmeras de alta velocidade, câmeras com alta sensibilidade luminosa, sensores óticos a bordo de satélites, detectores de partículas.

#### **Bibliografia**

BETZ, H.D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. "Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research", Springer, 2009

ENOTO, T., WADA, Y., FURUTA, Y., NAKAZAWA, K., YUASA, T., OKUDA, K., ... & UMEMOTO, D. (2017). Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. Nature, 551(7681), 481.

FÜLLEKRUG, M.; MAREEV, E. A.; RYCROFT, M. J. "Sprites, elves and intense lightning discharges", Springer, 2006

HARRISON, R. G. Atmospheric Electricity and Cloud Microphysics. Department of Meteorology, University of Reading, P.O. Box 243, Reading RG6 6BB, UK. 2001.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. "The Electrical Nature of Storms", Oxford Univ. Press, 1998

NAG, A., MURPHY, M. J., SCHULZ, W., & CUMMINS, K. L. (2015). Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques. Earth and Space Science, 2(4), 65-93.

NRC, "Studies in Geophysics: The Earth's Electrical Environment", National Academy Press, 1986  
RAKOV, V. A. "Fundamentals of Lightning", Cambridge Univ. Press, 2016  
RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Lightning Physics and Effects, 2003. Ed. Cambridge Univ. Press.  
SAUNDERS, C. P. R. "A review of thunderstorm electrification processes." Journal of Applied Meteorology 32.4 (1993): 642-655.  
STULL, R. Meteorology for scientists and engineers. Brooks/Cole, 2000.  
TSONIS, A. A. An introduction to atmospheric thermodynamics. Cambridge University Press, 2002.  
WILLIAMS, E. AND E. MAREEV. "Recent progress on the global electrical circuit." Atmospheric Research 135 (2014): 208-227  
WILLIAMS, E. R. "The Schumann resonance: a global tropical thermometer", Science, 256, 1184-1187, 1992

### **GES-315-4 Eletrodinâmica Atmosférica**

Equações de Maxwell no Vácuo e em Meios Materiais. Conservação da Energia e do Momento Linear. Ondas Eletromagnéticas no Vácuo e em Meios Materiais. Energia em Ondas. Polarização. Reflexão, Transmissão e Difração. Ondas em Meios Condutores. Pressão de Radiação. Reflexão em Superfícies Conductoras. Guias de Onda. Cavidades Ressonantes. Interação das Ondas com a Matéria. Ondas em Meios Dispersivos. Dispersão Normal e Anômala. Absorção Ressonante. Dispersão em Metais e Plasmas. Radiação. Dipolo Oscilante de Hertz. Potência Irrradiada. Fórmula de Larmor. Resistência de Radiação. Radiação em Grandes Distâncias. Antenas.

#### **Bibliografia**

SADIKU, M.N.O. Elementos de eletromagnetismo, 3a. Edição. Bookman, 2004  
GRIFFITHS, D. J. Eletrodinâmica, 3ª edição. Pearson & Companion Web, 2011.  
REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. Fundamentos da Teoria Eletromagnética. 3ª edição. Editora Campus Ltda, 1988.  
JACKSON, J.D. Classical Electrodynamics. 3rd ed. New York, NY, Wiley, 1999.  
FLEISCH, Daniel. A student's guide to Maxwell's equations. Cambridge University Press, 2008.  
BÉCHERRAWY, Tamer. Electromagnetism: Maxwell equations, wave propagation and emission. John Wiley & Sons, 2013.

### **GES-316-4 Simulação Numérica de Fenômenos de Plasmas Espaciais**

Introdução a elementos de diferenças finitas. Métodos Euler. Métodos de "leapfrog". Esquema de LAX-Wendroff. Métodos de Runge-Kutta e implícito. Simulação por partículas: uma introdução. Grades espaciais. Função peso. Simulação MHD: uma introdução. Modelos Híbridos.

#### **Bibliografia**

BIRDSALL, C.K. and LANGDON, A.B. Plasma Physics via Computer Simulation. MacGraw-Hill, 1985.  
DAWSON, J.M. Particles Simulations of Plasmas. Rev. Mod. Phys, 55:403-447, April, 1983.

MATSUMOTO, H. and OMURA, Y. Computer Space Plasma Physics, Simulation Techniques and Software, Terra Scientific Pub. Co., Tokio, 1993.  
POTTER, D. Computational Physics. John Wiley & Sons., 1973.

### **GES-401-4 Física da Ionosfera**

Pré-requisito: GES-205-4

Formação da Ionosfera. Processos Ionosféricos. Processos Químicos: reações químicas mais importantes nas regiões E, F1 e F2; reações químicas da região D, íons negativos e íons aglomerados. Processos Físicos: processos de transporte, difusão e eletrodinâmica da ionosfera. Fenômenos ionosféricos: irregularidades, "spread-F", cintilação, TID's, E esporádica, efeitos de tempestades magnéticas na ionosfera.

#### **Bibliografia**

AKASOFU, S.; CHAPMAN, S. Solar Terrestrial Physics. Oxford, Oxford Univ. Press, 1972.  
BANKS, P.M.; KOCKARTS, G. Aeronomy. New York, Academic, 1973. Parts A/B.  
BRASSEUR, G., SOLOMON, S. Aeronomy of the Middle Atmosphere. Dordrecht, Reidel, 1984.  
KELLEY, M.C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. San Diego, Academic, 1989.  
RISHBETH, H.; GARRIOTT, O.K. Introduction to Ionospheric Physics. New York, Academic, 1969.

### **GES-402-4 Dinâmica da Alta Atmosfera**

Pré-requisito: GES-200-4

Noções de Mecânica dos Fluidos. Descrição Lagrangeana e Euleriana do escoamento. Equações da continuidade, do movimento e da Energia aplicadas à atmosfera. Equações básicas. Frequência de Brunt-Vaissala. A estabilidade da atmosfera. Aproximações nas equações básicas: modelo quase-geostrófico, equações no plano  $\beta$ , modelo Euleriano médio, perturbações linearizadas. Ondas de Gravidade-Acústicas: desenvolvimento matemático, efeitos dissipativos, TID's, interação de Ondas de Gravidade com a ionosfera, observações. Marés atmosféricas: Teoria Clássica, observações e progressos recentes. Ondas Planetárias. Eletrodinâmica da Alta Atmosfera. Efeitos de cisalhamento. Teoria do Dínamo. Dinâmica Termosférica.

#### **Bibliografia**

ANDREWS, D.G.; HOLTON, J.R.; LEOVY, C.B. Middle Atmosphere Dynamics. New York Academic Press, 1987.  
BEER, T. Atmospheric Waves. Adam Hilger, 1975.  
CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. Atmospheric Tides. Gordon and Breach, 1970.  
KATO, S. Dynamics of the Upper Atmosphere. Dordrecht, D.Reidel, 1980.

### **GES-403-4 Física da Plasmasfera e Cinturões de Radiação**

Pré-requisito: GES-202-4



Movimento de partículas carregadas no campo geomagnético, teoria do centro de guia. Invariantes adiabáticos. Dinâmica da plasmasfera. Fontes e perdas. Corrente de anel: geração, decaimento, estrutura e composição. Relação com o meio interplanetário. Cinturões de elétrons e prótons. Estrutura. Processos de difusão. Ondas, interação onda-partícula e onda-onda. Constituintes minoritários. Precipitação de partículas. Produção de raios-X e ionização. Região auroral e anomalia magnética do Atlântico Sul.

### **Bibliografia**

LYONS, L.R.; WILLIAMS, D.J. Quantitative Aspects of Magnetospheric Physics. Reidel, 1984.

NORTHROP, T.G. The Adiabatic Motion of Charged Particles. New York, Wiley, 1963.

ROEDERER, J.G. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation. Berlin, Springer, 1970.

SCHULZ, M.; LANZEROTTI, L.J. Particle Diffusion in the Radiation Belts. Berlin, Springer, 1974

### **GES-404-4 Processos Não-Lineares de Plasma**

Pré-requisito: GES-204-4

Oscilações de Langmuir não-lineares. Sólitons e ondas de choque acústico-iônicos. Camadas duplas. Ondas eletromagnéticas não-lineares. Força ponderomotriz. Interações onda-onda não-lineares. Instabilidades paramétricas. Sólitons envoltórios e cávitons. Turbulência.

### **Bibliografia**

DAVIDSON, R. C. Methods in Nonlinear Plasma Theory. New York, Academic, 1972.

HASEGAWA, A. Plasma Instabilities and Nonlinear Effects. Berlin, Springer, 1975.

SAGDEEV, R. Z. and GALEEV, A. A. Nonlinear Plasma Theory. New York, Benjamin, 1969.

### **GES-405- 4 Física da Magnetosfera Externa**

Pré-requisito: GES-204-4

Interação do vento solar com o campo geomagnético. Magnetosfera aberta e fechada. Tempestades e sub-tempestades geomagnéticas. Onda de choque. Magnetopausa. Camada magnética. Cauda do campo geomagnético. Camada neutra e camada de plasma. Acoplamento Sol-meio interplanetário-magnetosfera. Magnetosferas planetárias.

### **Bibliografia**

KAMIDE, Y.; SLAVIN, J.A. Solar Wind-Magnetosphere Coupling. Dordrech, Reidel, 1986.

KENNEL, C.; LANZEROTTI, L.J.; PARKER, E.N. Solar System Plasma Physics. North Holland, 1979.

LEMAIRE, J.; RYCROFT, M.J., ed. Solar System Plasmas and Fields. Advances in Space Research, 2(1): 01-87, 1982.

NISHIDA, A. Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere. New York, Springer, 1978.

PARKS, G.K. Physics of Space Plasmas: an Introduction. Redwood City, California, Addison-Wesley, 1991.

#### **GES-409-4 Tópicos Especiais em Alta Atmosfera**

Abordam-se tópicos avançados em Alta Atmosfera. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

##### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

#### **GES-410-4 Tópicos Especiais em Eletricidade Atmosférica**

Abordam-se tópicos avançados em Eletricidade Atmosférica. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

##### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

#### **GES-411-4 Tópicos Especiais em Geomagnetismo**

Abordam-se tópicos avançados em Geomagnetismo. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

##### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

#### **GES-412-4 Tópicos Especiais em Ionosfera**

Abordam-se tópicos avançados em Ionosfera. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

##### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

#### **GES-413-4 Tópicos Especiais em Luminescência Atmosférica**

Abordam-se tópicos avançados em Luminescência Atmosférica. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

##### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

#### **GES-414-4 Tópicos Especiais em Magnetosfera-Heliosfera**

Abordam-se tópicos avançados em Magnetosfera-Heliosfera. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

##### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

### **GES-415-4 Tópicos Especiais em Média e Baixa Atmosfera**

Abordam-se tópicos avançados em Média e Baixa Atmosfera. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

#### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

Os trabalhos auxiliares ou finais do programa de Pós-Graduação serão identificados na forma abaixo indicada:

### **GES-416-4 Tópicos Especiais em Acoplamento Eletrodinâmico Atmosférico e Espacial**

Abordam-se tópicos avançados sobre o acoplamento eletrodinâmico das camadas atmosféricas entre si e de todo o sistema atmosférico com a região espacial próxima à terra. Conteúdo variado, de acordo com o interesse do momento.

#### **Bibliografia**

Artigos de Revistas Especializadas.

### **GES-730 Pesquisa de Mestrado em Geofísica Espacial\***

0 crédito

### **GES-750 Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial**

12 créditos

### **GES-780 Pesquisa de Doutorado em Geofísica Espacial\***

0 crédito

### **GES-800 Tese de Doutorado em Geofísica Espacial**

36 créditos

\*Atividade obrigatória, em cada período letivo para todo aluno em fase de Pesquisa, definida pela oficialização de seu Orientador de Pesquisa que avaliará o desempenho do aluno nesta atividade. Obrigatória, também, antes da oficialização citada, para o aluno que não esteja matriculado em alguma disciplina; neste caso, a orientação e avaliação deverá ser feita por Docente aprovado pelo Coordenador Acadêmico.

Catálogo aprovado pelo CPG em 29/11/2022.