Universidad Nacional de General San Martín

Escuela de Ciencia y Tecnología

Campus Miguelete

Martín de Irigoyen 3100

San Martín

Buenos Aires - Argentina

[www.unsam.edu.ar](http://www.unsam.edu.ar/)



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| PROYECTO DE CÁTEDRA | | |
| MATERIA | Inferencia Bayesiana Causal | |
| CARRERAS | Licenciatura en Ciencias de Datos | |
| MODALIDAD | Presencial | |
| SEDE (si es presencial) | Campus Miguelete | |
| TIPO | Teórico-práctica | |
| PERÍODO DE VIGENCIA | Segundo cuatrimestre 2024 | |
| DURACIÓN | Cuatrimestral | |
| EQUIPO DOCENTE | Profesor/a: Gustavo Landfried | |
| MATERIAS CORRELATIVAS |  | |
| CARGA HORARIA | Clases Teórico-prácticas: 96h | Total horas semanales: 6h |

# MARCO REFERENCIA

Esta materia está enfocada en la evaluación de argumentos causales alternativos mediante (aproximaciones a) el sistema de razonamiento de las ciencias con datos: la aplicación estricta de las reglas de la probabilidad.

La Electiva 2 ``Inferencia Bayesiana Causal'' tiene por principal objetivo revisar los métodos desarrollados en las últimas décadas para: especificar matemáticamente los argumentos causales expresados en lenguaje natural mediante métodos gráficos intuitivos; precisar cómo la estructura causal influye en el flujo de inferencia entre las variables del modelo; identificar el efecto causal entre variables de un modelo causal en base a datos observacionales; y diseñar experimentos que permitan evaluar modelos causales alternativos; y tomar decisiones óptimas en contextos de incertidumbre.

# OBJETIVOS O PROPÓSITOS

* Dominio de los métodos de especificación matemática de argumentos causales expresados en lenguaje natural mediante redes bayesianas y factor graphs.
* Destreza para la identificación de los flujos de inferencia en cualquier estructura causal y de las condiciones necesarias para evaluar efectos causales en ausencia de intervenciones.
* Capacidad para diseñar experimentos que permitan evaluar modelos causales alternativos y aptitud para realizar la inferencia aproximando la aplicación estricta de las reglas de la probabilidad.
* Comprensión de los cíclos de acción-percepción y habilidad para seleccionar los comportamientos óptimos en problemas de toma de decisiones temporales.

# CONTENIDOS / PROGRAMA ANALÍTICO

**Unidad 1. Introducción a la especificación y evaluación de argumentos causales**

* Descripción y explicación. La estructura matemática del discurso descriptivo. Los generalizaciones empíricas y los enunciados teóricos. Aprendizaje basado en modelos. Distribuciones de creencias honestas
* Las reglas de razonamiento en contextos de incertidumbre: preservar la creencia previa que sigue siendo compatible con el dato y predecir con la contribución de todas las hipótesis. Métodos gráficos de especificación matemática de argumentos causales.
* Evaluación de modelos causales alternativios: generación de datos sintéticos y aplicación estricta de las reglas de la probabilidad. Ejemplos de modelos identificables y no identificables a partir de observaciones sin intervenciones.
* Bibliografía sugerida: Samaja (3.1-3.4), Klimovsky (4), Bishop [6] (1-4).

**Unidad 2. Emergencia del overfitting por selección y el balance natural por evaluación**

* Distribuciones conjugadas. Ejemplos varios. Caso en profundiad: regresión polinomial basada en la aplicación estricta de las reglas de la probabilidad. El problema computacional de la aplicación estricta de las reglas de la probabilidad.
* Aproximación de la inferencia mediante métodos de estimación puntal basados en funciones de costo ad-hoc: máxima verosimilitud, máximo a posteriori y validación cruzada. Efectos secundarios de la ruptura de las reglas de la probabildiad: el sobreajuste (overfitting).
* La ausencia de efectos indeseados en el sistema de razonamiento probabilístico: el balance natural mediante la evaluación completa del espacio de hipótesis. Ensambles de modelos. Procesos gaussianos.
* Bibliografía sugerida. Bishop [2] (1.1-1.3, 2.1-2.3, 3.3-3.4, 6.4.1-6.4.2)

**Unidad 3. Sorpresa: el problema de la comunicación con la realidad**

* Los niveles de la base empírica. La estructura invariante del dato científico y el lugar que ocupan los supuestos. El isomorfismo con los sistemas de información emisor-receptor de la teoría de la información.
* La natrualeza multiplicativa de la función de costo de la teoría de la probabilidad. Su rol en la construcción de sistemas de comunicación con la realidad. Analogías con las apuestas y la propiedad epistémica.
* Evaluación de sistemas de comunicación alternativos en base a su tasa de sorpresa. Ejemplos. Interpretación de entropía y entropía cruzada. Definición de “no mentir” como máxima entropía dadas las restricciones.
* Bibliografía sugerida: Klimovsky (2), Samaja (3.5, 3.6.2-5), MacKay (1.1, 2.4-6, 4.1). Kelly (paper).

**Unidad 4. Especificación de teorías causales, flujo de inferencia.**

* Método gráficos de especificación matemática de modelos causales probabilísticos mediante *factor graphs*. Análisis del flujo de inferencia mediante la descomposición de las reglas de la probabildiad como mensajes entre los nodos del grafo, *sum-product algorithm*.
* Las teorías causales como sistemas dinámicos de modelos causales que se prenden y apagan en función del contexto. Los conceptos de *potential outcome* y *do-operator*. Su especificación mediante *gates*.
* La paradoja de Yule-Simpson. Flujo de inferencia (independencia condicional) en las estructuras elementales: pipe, fork, collider. El criterio de d-separación. Los niveles de razonamiento causal: asociacional, intervencional, y contrafactual.
* Bibliografía sugerida. Winn (paper), Bishop (8.2-8.2.2, 8.4-8.4.4, 8.4.7). Neal (2.1, 3, 4.1), Pearl (1).

**Unidad 5. Estimación de efecto causal.**

* El efecto de las intervenciones: *truncated factorization*, *inverse probability weighting*, *propensity scores*. Estimación de efectos causales en datos no-experimentales mediante *adjustment formula.* Su generalización, *g-computation algorithm formula*.
* Métodos gráficos para predicción del contrafactual: *twin networks*. Métodos gráficos general para identificar el tipo de ajuste requerido: el b*ackdoor criterion.* Estimaciones no paramétricas: *frontdoor criterior y do-calculus.* Variables instrumentales y otros criterios.
* Ejemplo de estructuras causales y clasificación de variables como buenos, neutrales o malos para la identificación del efecto causal mediante backdoor criterion.
* Bibliografía sugerida. Pearl (3,6-7), Hernán (parte I), Cinelli (paper), Neal (4, 6, 7.5-7.6).

**Unidad 6. Ciclos de acción-percepción: el problema de la interacción con la realidad**

* El ciclo acción-percepción entre agente y ambiente: percepción (reward-signal), inferencia (hipótesis/modelos), predicción (objetivo) acción (política/intervención). Diferencia entre señal y reward.
* Especificación de objetivos como problemas de maximización de utilidad esperada de la intervenciones en el tiempo. La reformulación ergódica de la teoría de utilidad esperada. Especificación gráfica de *rewards* mediante diagramas de influencia: sequential backdoor criterion.
* Control óptimo en *Partial Observed Markov Decision Process* (POMDP). Ejemplos varios. Evaluación de de políticas de intervención.
* Bibliografía sugerida: Levine (1-2), Pearl (4), Peters (paper). Otras: Sutton-Barto (3), Koller (21).

**Unidad 7. Métodos de evaluación de teorías causales**

* La evaluación de modelos como un juego de interacción acción-percepción con la naturaleza. La naturaleza de la función costo para evaluación de modelos causales alternativos.
* Métodos de Monte Carlo para evaluar modelos: *Bridge Sampling*, t*hermodynamical integration*, *importance sampling*.
* Ejemplos de evaluación de modelos causales a través de datos obtenidos por interacción con una simulador causal suyacente oculto. Evaluación de acciones (*policies*) alternativas. La emergencia de la estrategia falsacionisita como comportamiento óptimo.
* Bibliografía sugerida. Kass (paper), Pearl (7,9). Hernán (parte II) Otros: Vousden, Perrakis, Gronau.

**Unidad 8. Inferencia causal en series temporales.**

* Modelos de historia completa. Los problemas de usar el último posterior como prior del siguiente evento (enfoque de filtering). Algoritmo *loopy belief propagation* para la propagación de la información por toda la red histórica causal (enfoque de smoothing).
* State-space models. Evaluación del efecto causal en series temporales, contrafactuales. Intervenciones en series temporales. Métodos de monte carlo para series temporales: *sequential importance resampling*.
* Estimación de efecto causal por simulación de contrafctuales en series temporales. Evaluación de modelos causales alternativos. Apuestas óptimas en deportes: criterio Kelly, fractional Kelly.
* Bibliografía sugerida. Brodersen (paper), Dangauthier (paper), Bishop (13.2.3-13.2.4, 13.3), Hernán (parte II).

**Unidad 9. Isomorfismo probabilidad-evolución y hackatón “apuestas de vida”.**

* Isomorfismo entre las ecuaciones fundamentales de la teoría de la probabilidad (teorema de Bayes) y la teoría de la evoluición (replicator dynamic). La naturaleza multiplicativa de la función de costo epistemico-evolutivo.
* Las emergencia de las variantes que reducen las fluctuaciones por diversificación individual (propiedad epistémica), cooperación (propiedad evolutiva), especialización (propiedad de especiación), y heterogeneidad (propiedad ecológica).
* Presentación de una competencia de inferencia, intervención, apuestas e intercambios de recursos.
* Bibliografía sugerida. Peters (paper). Czegel (paper). Koller (23).

# ENCUADRE METODOLÓGICO

Los encuentros sincrónicos tendrán una parte expositiva en la que se abordarán los contenidos de la materia y se combinarán con actividades interactivas, debates o ejercicios.

# METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La materia se evalúa por medio de entragas quincenales individuales y un trabajo práctico final integrador.

* Entregas quincenales
  + Implementación de código de inferencia y planificación.
  + Respuesta preguntas de selección multiple y de escritura.
  + Nota: La media geométrica de las predicciones.
* Trabajo práctico integrador
  + Problema de inferencia con
  + Se trabajará en clase
  + Nota: La media geométrica de las predicciones.
* Materia
  + Nota del curso: deben tener apropbados ambos

# METODOLOGÍA DIDÁCTICA

Se enfoca en la combinación de teoría y práctica para asegurar la comprensión profunda de los conceptos fundamentales y su aplicación en la resolución de problemas de inferencia e planificación. Se estructura de la siguiente manera:

* Enfoque Práctico: El curso se desarrolla principalmente a través de actividades prácticas en las que los estudiantes aplican los conceptos aprendidos en la resolución de problemas de inferencia y planificación. Se utilizarán ejercicios prácticos en laboratorio y proyectos prácticos individuales y/o grupales para reforzar los conocimientos adquiridos.
* Resolución de Problemas: Se fomentará la resolución de problemas como parte integral del proceso de aprendizaje. Se presentarán problemas desafiantes que requieran la aplicación de los conceptos estudiados, y los estudiantes serán guiados en el proceso de análisis, diseño e implementación de soluciones eficientes.
* Discusión: Se promoverá la participación activa de los estudiantes en discusiones grupales y sesiones de retroalimentación, donde podrán compartir sus experiencias, plantear dudas y recibir comentarios sobre su trabajo. Esto facilitará el intercambio de ideas y la colaboración entre los estudiantes.

Esta metodología busca proporcionar a los estudiantes una experiencia de aprendizaje dinámica y práctica que les permita desarrollar habilidades sólidas en el diseño, análisis e implementación de algoritmos y estructuras de datos.

# CRONOGRAMA

Semanas.

1. Introducción a la especificación y evaluación de argumentos causales

Evaluación de modelos causales alternativio

1. Emergencia del overfitting por selección y el balance natural por evaluación
2. Sorpresa: el problema de la comunicación con la realidad
3. Especificación de teorías causales y algoritmos de inferencia por pasaje de mensajes entre los nodos de la red causal
4. Flujo de inferencia, criterio de d-separación y niveles de razonamiento causal: asociacional, intervencional, y contrafactual. *Twin networks*.
5. El efecto de las intervenciones: *truncated factorization*, *inverse probability weighting*, *propensity scores*. Ejemplos varios.
6. Estimación de efectos causales en datos no-experimentales mediante *adjustment formula,* b*ackdoor*, *frontdoor y do-calculus.* Ejemplos*.*
7. Más ejemplo de estructuras causales y clasificación de controles para la estimaciómn del efecto causal.
8. Ciclos de acción-percepción y reformulación ergódica de la teoría de utilidad esperada. Planificación en Markov Decision Process.
9. Aplicación de métodos de Monte Carlo para evaluar modelos causales alternativos en base a datos obtenidos por intervención.
10. Ejemplos de planificación de intervenciones en ciclos de de acción-percepción para evaluar modelos causales alternativos.
11. Flujo de inferencia en modelos de historia completa. Enfoque de filtrado, smoothing y algoritmo *loopy belief propagation.*
12. Inferencia causal en series temporales. Ejemplos varios.
13. Isomorfismo probabilidad-evolución. Apuestas óptimas en deportes. Presentación de una competencia de inferencia, intervención, apuestas e intercambios de recursos.
14. Hackatón “apuestas de vida”.
15. Presentación oral de resultados. Cierre y conclusiones.

# BIBLIOGRAFÍA

* **Pearl** J. Causality. Cambridge university press; 2009.
* **Hernán** MA, Robins JM. Causal inference: What if. 2020.

**SUGERIDA / COMPLEMENTARIA**:

* **Bishop**. Model-based machine learning. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2013
* **Bishop.** Pattern recognition and machine learning. Springer; 2006
* **Brodersen** KH, Gallusser F, Koehler J, Remy N, Scott SL. Inferring causal impact using Bayesian structural time-series models. The Annals of Applied Statistics. 2015;
* **Chopin** N, Papaspiliopoulos O, et al. An introduction to sequential Monte Carlo. Vol. 4. Springer; 2020.
* **Cinelli** C, Forney A, Pearl J. A crash course in good and bad controls. Sociological Methods & Research. 2022
* **Czégel** D, Giaffar H, Tenenbaum JB, Szathmáry E. Bayes and Darwin: How replicator populations implement Bayesian computations. BioEssays. 2022.
* **Dangauthier** P, Herbrich R, Minka T, Graepel T. Trueskill through time: Revisiting the history of chess. In: Advances in Neural Information Processing Systems; 2008
* **Gronau** QF, Sarafoglou A, Matzke D, Ly A, Boehm U, Marsman M, et al. A tutorial on bridge sampling. Journal of mathematical psychology. 2017.
* **Jaynes** ET. Bayesian methods: General background; 1984.
* **Kass** RE, Raftery AE. Bayes factors. Journal of the american statistical association. 1995.
* **Kelly** jr JL. A New Interpretation of Information Rate. Bell System Technical Journal. 1956
* **Klimovsky** G. Las desventuras del conocimiento cientı́fico; 1994
* **Koller** D, Friedman N. Probabilistic graphical models: principles and techniques. MIT press; 2009.
* **Levine** S. Reinforcement learning and control as probabilistic inference: Tutorial and review. arXiv preprint arXiv:180500909. 2018.
* **MacKay** DJ. Information theory, inference and learning algorithms. Cambridge university press; 2003.
* **McElreath** R. Statistical rethinking: A Bayesian course with examples in R and Stan. 2020
* **Martin** OA, Kumar R, Lao J. Bayesian Modeling and Computation in Python. CRC Press; 2022.
* **Neal**. Introduction to causal inference. Course Lecture Notes (draft). 2020;
* **Parr** T, Pezzulo G, Friston KJ. Active inference: the free energy principle in mind, brain, and behavior. MIT Press; 2022.
* **Pearl** J. Causality. Cambridge university press; 2009.
* **Perrakis** K, Ntzoufras I, Tsionas EG. On the use of marginal posteriors in marginal likelihood estimation via importance sampling. Computational Statistics & Data Analysis. 2014.
* **Peters** O. The ergodicity problem in economics. Nature Physics. 2019.
* **Popper** K. La lógica de la investigación cientı́fica; 1967.
* **Samaja** J. Epistemologı́a y metodologı́a: elementos para una teorı́a de la investigación cientı́fica. EUDEBA; 1999.
* **Sutton** RS, Barto AG. Reinforcement Learning: An Introduction. Second edition. MIT Press; 2018.
* **Vousden** W, Farr WM, Mandel I. Dynamic temperature selection for parallel tempering in Markov chain Monte Carlo simulations. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016
* **Winn** J. Causality with gates. In: Artificial Intelligence and Statistics. PMLR; 2012.