

PROGRAMA DE ACTIVIDAD CURRICULAR¹

I. Identificación de la actividad curricular

Nombre del programa	Doctorado en Ciencias de Recursos Naturales	Duración (semanas)	20 semanas
Nombre actividad curricular	Modelación hidrológica	Horas totales y semanales	Intra-aula teórica semanal: 0 Intra-aula práctica semanal: 0 Intra-aula T/P semanal: 4 Extra-aula semanal: 4 Intra-aula total: 80 Extra-aula total: 80
Tipo Formación	Especializada	SCT	6
Carácter	Teórico-Práctico	Requisitos	No tiene
Año académico	2025	Semestre	II semestre
Docente(s)	Responsable: Mauricio Zambrano-Bigiarini	Plataforma en uso	Campus Virtual
N° de asignatura en el Plan	5 y 6		

II. Perfil del graduado/especialista

La Doctora o el Doctor en Ciencias de Recursos Naturales es una investigadora o un investigador, con una formación integral en ciencias de los recursos naturales en el contexto de la sustentabilidad ambiental, con sólidas competencias para (1) desarrollar ciencia, tecnología e innovación orientada a la conservación de los recursos naturales y (2) difundir el conocimiento a la comunidad científica y a la sociedad en general.

Posee una formación multidisciplinaria en los procesos físico-químicos, biológicos y microbiológicos asociados a los recursos naturales, y su relación con la producción vegetal, su conservación, prevención y biorremediación de suelos, lo que le habilita para (1.1) generar investigación original en el campo de las ciencias de recursos naturales y productos derivados, (2.1) gestionar la publicación de artículos científicos en base al conocimiento disciplinario o resultados de investigación en revistas reconocidas internacionalmente y (2.2) difundir sus resultados a públicos especializados y no especializados, contribuyendo a la valorización de los recursos naturales, cuidado del medioambiente y seguridad alimentaria. (2.3) Generar

¹ Las actividades curriculares son todas aquellas actividades académicas que conforman el plan de estudios del Programa, es decir, las asignaturas, seminarios de investigación, electivos, trabajo de grado, examen final, entre otras.

estrategias de transferencia y protección intelectual para resguardar resultados innovadores de investigación.

Así también, demuestra capacidad de trabajo en equipos multidisciplinarios, con pensamiento crítico, y evidencia de ética y responsabilidad social en su quehacer profesional.

III. Descripción de la actividad curricular

Este curso profundiza la formación de los estudiantes interesados en el área de recursos hídricos, a través de la capacitación en la aplicación de una serie de técnicas que permiten simular matemáticamente la transformación de la precipitación en escorrentía superficial en una cuenca hidrográfica. La primera parte del curso revisa los distintos tipos de modelos hidrológicos, su estructura, y la formulación de un modelo conceptual para representar los procesos hidrológicos de una cuenca determinada. Luego, se describen las principales fuentes de datos in situ y grillados existentes. Se presentan brevemente algunas técnicas para realizar análisis de sensibilidad, calibración y verificación de un modelo hidrológico seleccionado, y análisis de incerteza de los parámetros del modelo y de los resultados entregados por el mismo. Luego, se discuten técnicas de regionalización de parámetros para implementar un modelo hidrológico en cuencas sin control fluviométrico. Finalmente se presentan los distintos tipos de escenarios de cambio climático disponibles para Chile y se analizan los impactos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca.

IV. Programa orientado al desarrollo de las siguientes competencias

Genéricas ²	De especialidad o disciplinares ³
Pensamiento crítico	1.1 Generar investigación original en el campo de las ciencias de recursos naturales y productos derivados.

V. Resultados de aprendizaje⁴ (desarrolla el docente)

Al finalizar con éxito la asignatura o módulo los estudiantes deberán ser capaces de:

- RA 4.1.2 Justifica resultados y procedimientos entregando evidencias que dan validez a su postura.

² Se refiere a aquellos conocimientos, habilidades o actitudes que son transversales al ejercicio profesional en cualquier área. Ante la actual promoción de tres competencias genéricas desde el Marco Nacional de Cualificaciones (Responsabilidad, Autonomía y Trabajo con otros), se evalúa institucionalmente la adscripción transversal de todos los Programas a éstas o la posibilidad de incluirlas como atributos de ingreso para los postulantes a los Programas.

³ Se refiere al conjunto de conocimientos, habilidades o actitudes que el programa ha definido como propias del ejercicio profesional en su área específica o disciplina, las cuales el programa evidencia a lo largo de su plan de estudios.

⁴ En este apartado se describirán los conocimientos, habilidades o actitudes que el estudiante deberá demostrar para aprobar la asignatura y con ello desarrollar las competencias declaradas en el perfil del graduado. Comenzar con verbos en tercera persona singular (presente simple).



- RA 1.1.2. Aplica con rigurosidad los componentes del método científico a través de la resolución experimental de un problema de investigación en el campo de los recursos naturales.
- RA 1.1.4. Plantea un diseño experimental utilizando herramientas estadísticas que estén en concordancia con el tipo de problema a estudiar.
- RA 1.1.6. Integra los principios y conceptos básicos de las ciencias de los recursos naturales asociados a los fundamentos científicos y tecnológicos para la investigación, desarrollo e innovación en soluciones sustentables a los procesos de deterioro de los recursos naturales.

VI. Contenidos⁵ (desarrolla el docente)

Unidades Temáticas:

1. Modelos hidrológicos. Contexto de la modelación hidrológica. Tipos de modelos hidrológicos. Estructura de un modelo. Formulación del modelo conceptual. Selección e implementación del modelo computacional.
2. Datos hidro-meteorológicos. Fuentes de datos in-situ existentes en Chile. Datos satelitales existentes en el mundo, con sus respectivas resoluciones espaciales y temporales. Selección e implementación de datos hidro-meteorológicos para una cuenca hidrológica.
3. Análisis de sensibilidad. Concepto. Descripción general de técnicas locales (Morris) y globales (Sobol). Aplicación computacional de la técnica de Sobol para identificación de los parámetros sensibles de un modelo.
4. Calibración/optimización. Concepto. Descripción general de técnicas locales (Levenberg-Marquardt) y globales (Shuffled Complex Evolution, Differential Evolution, Particle Swarm Optimization). Frente de Pareto y concepto de calibración multi-objetivo. Aplicación computacional de Particle Swarm Optimisation (PSO) para estimar los valores numéricos de un modelo.
5. Análisis de incerteza. Concepto. Descripción general de la técnica Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE). Aplicación computacional de GLUE en un modelo.
6. Regionalización. Firmas hidrológicas. Técnicas de regionalización.
7. Impacto del cambio climático. Escenarios de cambio climático disponibles para Chile. Descripción general de técnicas de “downscaling”.

⁵ En este apartado se identifican los contenidos que serán abordados en la asignatura, los cuales deben ser los que permiten el logro de los resultados de aprendizaje esperados. En este sentido, es ideal que los contenidos sean agrupados en unidades temáticas.

VII. Metodologías y estrategias de enseñanza-aprendizaje⁶ (desarrolla el docente)

Metodología de docencia directa (horas intra-aula):

- Clase expositiva. Presentación de un tema lógicamente estructurado, a cargo del profesor o estudiante, donde el recurso principal es el lenguaje oral, aunque puede ser un texto escrito. Involucra diálogo e interacción con los estudiantes para promover el logro de los resultados de aprendizaje. Además del profesor o estudiante, esta puede estar a cargo de alguna persona externa al curso, como algún experto del tema a exponer.
- Presentaciones orales. Presentación de un tema técnico previamente asignado de forma individual o grupal, en base a la capacidad de síntesis del estudiante y comunicación de los resultados.
- Trabajo en equipo. Análisis intensivo y completo de un caso de estudio con la finalidad de conocerlo, interpretarlo, resolverlo, generar hipótesis, contrastar datos, reflexionar, completar conocimientos, diagnosticarlo y evaluar procedimientos alternativos de solución. Los estudiantes aprenden sobre la base de experiencias y situaciones de la vida real.

Metodología de trabajo autónomo (horas extra-aula)

- Lectura de temas (en inglés y español) asignados por el docente con anterioridad a cada clase teórica.
- Recopilación y análisis de datos hidrológicos reales para distintos casos de estudio.
- Aplicación de la competencia aprender a aprender (adquirida en cursos previos) para la adquisición de capacidades avanzadas de trabajo con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Programación Científica (utilizando el ambiente estadístico R).
- Desarrollo y aplicación de algoritmos de análisis de datos hidrológicos.
- Elaboración de informes escritos donde se resume de forma escrita los principales resultados alcanzados en el caso de estudio asignado a cada equipo.
- Preparación de presentaciones orales donde se resume de maneja audiovisual los principales resultados alcanzados en el caso de estudio asignado a cada equipo.

⁶ En este apartado se clarifican las metodologías que se utilizarán en la sala de clases, en donde se espera que el estudiante vaya teniendo un rol más activo y protagónico en sus procesos de formación. También se identifican aquellos trabajos que los estudiantes deberán desarrollar autónomamente en grupos o de manera individual fuera de la sala de clases.

VIII. Evaluación⁷ (desarrolla el docente)

En esta asignatura la parte teórica y la parte práctica se aprueban en conjunto.

La evaluación la parte teórica de este curso contempla la realización de presentaciones orales sobre un tema previamente asignado y la evaluación del docente a la participación en clases de cada estudiante.

Por otra parte, la evaluación de la parte práctica consta de un proyecto final para aplicación de conocimientos prácticos y de tres informes de avance parcial. El proyecto final consta de un informe escrito final y una presentación oral final.

La nota de presentación del curso se calcula de la siguiente manera:

$$NP = 0.5 * \text{Teoría} + 0.5 * \text{Práctico}$$

$$\text{Teoría: } 0.8 * \text{Presentaciones Orales} + 0.2 * \text{Participación Clases}$$

$$\text{Práctico: } 0.2 * \text{Informes De Avance} + 0.4 * \text{Informe Escrito Final} + 0.4 * \text{Presentación Oral Final}$$

Presentaciones orales:

Corresponderán a presentaciones orales realizadas por cada estudiante a lo largo del semestre, en base a la lectura de artículos (en inglés) asignados por el docente.

Participación clases:

La participación en clases será evaluada por el docente de acuerdo a la cantidad y calidad de las preguntas e intervenciones de cada estudiante durante el semestre.

Proyecto final:

Cada grupo deberá definir una o más preguntas científicas relacionadas a procesos hidrológicos, formular hipótesis en torno a ellas, y aplicarlas a una cuenca seleccionada durante el desarrollo de un proyecto semestral. Las preguntas e hipótesis deberán ser verificadas mediante el uso de uno o más modelos hidrológicos. El proyecto final del curso puede estar estrechamente relacionado con los intereses de investigación de los estudiantes.

El proyecto final del curso incluirá la entrega de tres informes de avance cuyos contenidos y fechas de entrega se detallan en el calendario del curso. Además, cada grupo deberá entregar un informe escrito final con formato de artículo científico (60% de la parte práctica) y una presentación oral final grupal (40% de la parte práctica) donde se expondrán y discutirán los principales resultados y conclusiones.

De acuerdo al reglamento de régimen de estudios de Pregrado de la Universidad de la Frontera, artículos 48° al 52°, el estudiante deberá justificar su ausencia a las evaluaciones y/o actividades curriculares en un plazo máximo de 5 días hábiles de iniciada la inasistencia, mediante formulario de inasistencia ante el Director(a) de Carrera, quien podrá aceptarla o rechazarla. Cuando la inasistencia es por motivos de salud, el estudiante deberá solicitar la

⁷ En la evaluación se evidencia todas aquellas estrategias que permitirán constatar el logro de los resultados de aprendizajes esperados en la asignatura, por lo que deben ser coherentes a las estrategias de enseñanza-aprendizaje.

justificación en un plazo no superior a los 5 días hábiles desde que reinicia sus actividades académicas. En cualquiera de los casos anteriores, el estudiante deberá hacer llegar al profesor titular de la asignatura, o al responsable de la actividad curricular que se desea justificar, una copia del documento entregado por el Director de Carrera, en un plazo no mayor a 3 días hábiles desde la emisión del documento. La no presentación de este comprobante dentro de los 3 días antes mencionados, implica la aceptación tácita de una nota igual a 1.0 en la evaluación faltante

Recuerde que la evaluación se rige por el Reglamento de Régimen de Estudio.

- *Los resultados de las evaluaciones mayores se deben dar a conocer una semana antes de la próxima evaluación.*
- *Con nota de reprobación 3.6 o superior los estudiantes tienen derecho a examen en las fechas establecidas en el calendario académico.*

PLAGIO: es el uso de un trabajo, idea o creación de otra persona, sin citar la apropiada referencia y constituye una falta ética. En la actualidad, con las herramientas de informática es fácilmente detectable. En ninguna actividad curricular se acepta el plagio, ya sea en presentaciones orales, escritas o visuales, por lo que quien lo cometa será sancionado académicamente.

IX. Bibliografía y Recursos⁸ (desarrolla el docente)

Básica

Básica

- Beven, K. J. (2012). Rainfall-runoff modelling: The Primer, 2nd Edition. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-71459-1.

Complementaria

Complementaria

- Beck, H. E., A. I. J. M. van Dijk, A. de Roo, D. G. Miralles, T. R. McVicar, J. Schellekens, and L. A. Bruijnzeel, 2016: Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. Water Resour. Res., 52, 3599?3622, doi:10.1002/2015WR018247
- Bennett, N. D., Croke, B. F., Guariso, G., Guillaume, J. H., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., ... & Pierce, S. A. (2013). Characterising performance of environmental models. Environmental Modelling & Software, 40, 1-20.
- Fenicia, F., D. Kavetski, H. H. G. Savenije, M. P. Clark, G. Schoups, L. Pfister, and J. Freer, 2014: Catchment properties, function, and conceptual model representation: Is there a correspondence? Hydrol. Process., 28, 2451?2467, doi:10.1002/hyp.97
- Gaber, N., Foley, G., Pascual, P., Stiber, N., Sunderland, E., Cope, B., ... & Zaleem, Z. (2009). Guidance on the development, evaluation, and application of environmental models. Report, Council for Regulatory Environmental Modeling, 81

⁸ Es todo material bibliográfico, audiovisual u otro, que permite abordar los contenidos o unidades temáticas declaradas.



- Harmel, R. D., Smith, P. K., Migliaccio, K. W., Chaubey, I., Douglas-Mankin, K. R., Benham, B., ... & Robson, B. J. (2014). Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: A review
- Hrachowitz, M., and M. P. Clark, 2017: HESS Opinions : The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3953-3973, doi:10.5194/hess-21-3953-2017.
- Jakeman, A. J., Letcher, R. A., & Norton, J. P. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 21(5), 602-614
- Matott, L. S., Babendreier, J. E., & Purucker, S. T. (2009). Evaluating uncertainty in integrated environmental models: a review of concepts and tools. *Water Resources Research*, 45(6).
- Karlsson, I. B., Sonnenborg, T. O., Refsgaard, J. C., Trolle, D., Børgesen, C. D., Olesen, J. E., ...& Jensen, K. H. (2016). Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate
- Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process? a framework and guidance. *Environmental modelling & software*, 22(11), 1543-1556.
- Saltelli, A., & Funtowicz, S. (2014). When all models are wrong. *Issues in Science and Technology*, 30(2), 79-85.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of hydrology*, 523, 739-757
- Uusitalo, L., Lehtikoinen, A., Helle, I., & Myrberg, K. (2015). An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environmental Modelling & Software*, 63, 24-31.
- Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., & Woods, R. (2007). [Catchment classification and hydrologic similarity](<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x>). *Geography compass*, 1(4), 901-931. doi:10.1007/s00477-005-0006-5
- Wagener, T., & Gupta, H. V. (2005). [Model identification for hydrological forecasting under uncertainty](<https://doi.org/10.1007/s00477-005-0006-5>). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6), 378-387. doi: 10.1007/s00477-005-0006.



Recursos

Recursos digitales

- Software: TUWmodel: modelo hidrológico conceptual.
- Software: GR4J, GR5J, GR6J, GR6-CemaNeige: modelos hidrológicos conceptuales
- Software: airGRteaching: airGRteaching: Teaching Hydrological Modelling with the GR Rainfall-Runoff
- Software QGIS (<https://www.qgis.org>)
- Software SAGA (<http://www.saga-gis.org/>)
- Ambiente estadístico R (<https://www.r-project.org/>)
- Datos CAMELS-CL sobre cuencas de Chile (<http://camels.cr2.cl/>)
- Plataforma Mawün(<http://mawun.cr2.cl/>)
- Plataforma Mawün-NRT (<http://mawunnrt.cr2.cl/>)
- Explorador Climático del CR2 (<https://explorador.cr2.cl/>)

Artículos científicos (en inglés)