



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Corso di Laurea in Metodi e Modelli per Data Science

Informazioni

Segreteria didattica: *Cristiano Di Meo*, tel. 06 72594685

Coordinatore Corso di Laurea: *Prof.ssa Carla Manni*

Sito web: <http://www.mat.uniroma2.it/datascience/>

E-mail: dida@mat.uniroma2.it

Il Corso di Laurea in Metodi e Modelli per Data Science si inquadra nella Classe delle Lauree in “Scienze Matematiche” (Classe L-35 del DM 16 marzo 2007). Il Corso afferisce al Dipartimento di Matematica e si svolge nella macroarea di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali. I Dipartimenti di Economia e Finanza, Fisica ed Ingegneria dell’Impresa “Mario Lucertini”, sono associati nella costituzione del Corso di studio.

Il corso di studio punta ad integrare un’ampia preparazione di base nei settori della Matematica e dell’Informatica più rilevanti per lo studio, la gestione e l’analisi dei dati (per brevità Data Science), con una formazione fortemente interdisciplinare nella quale gli studenti possano acquisire familiarità in alcuni degli ambiti applicativi in cui la Data Science ha già mostrato la sua grande rilevanza, quali ad esempio l’Ingegneria, l’Informatica e la Finanza. Le metodologie che vengono introdotte non sono considerate dal punto di vista meramente applicativo, ma ci si pone l’obiettivo di comprenderne in profondità i fondamenti matematici e la logica di sviluppo, per formare laureati che siano in grado di innovare le procedure esistenti sia dal punto di vista teorico sia in funzione del loro specifico utilizzo.

Premi e Borse

Il Dipartimento di Matematica istituisce, per gli studenti immatricolati nell’AA 2025/26 al Corso di Laurea in Metodi e Modelli per Data Science, **2 premi di laurea triennale** dell’importo di **1000 euro** ciascuno. Informazioni dettagliate sono reperibili sul sito del Corso di Laurea.

Indice

Presentazione del corso	3
Sbocchi lavorativi	4
Ordinamento degli studi	4
Piano di studio	4
Calendario 2025/2026	8
Docenti tutor	8
Esami	8
Valutazione	8
Piani di studio	9
Prova finale	9

Programmi dei corsi (didattica erogata 2025/26)	10
Algebra e Geometria	10
Algebra Lineare e Model Order Reduction	11
Algoritmi e Strutture Dati	11
Algoritmi e Strutture Dati per Big Data	12
Analisi di Serie Temporali	13
Analisi Economica	13
Analisi Matematica I	15
Analisi Matematica II	16
Analisi Numerica e Ottimizzazione Numerica	17
Basi di Dati	18
Econometria	18
Fisica e Analisi Dati	19
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo I	20
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo II	20
Grafi e Complex Networks	21
Introduzione all'Intelligenza Artificiale e Machine learning con Laboratorio	22
Machine Learning	23
Metodi di Approssimazione per Big Data	24
Metodi Matematici per la Finanza	25
Probabilità I	26
Probabilità e Statistica II	27
Statistica I	28
Didattica programmata	28

Presentazione del corso

L'obiettivo del corso di studio è quello di formare laureati con competenze fortemente spendibili sul mercato del lavoro, ma contemporaneamente con conoscenze che permettano ulteriori studi specialistici in tutti i campi in cui la Data Science sta mostrando la sua efficacia.

Il corso è erogato in modalità convenzionale. La durata normale del corso è stabilita in 3 anni. Per conseguire la laurea lo studente deve aver acquisito 180 crediti, comprensivi di quelli relativi alla conoscenza obbligatoria, oltre che della lingua italiana, della lingua inglese.

Per le matricole

Verifica delle conoscenze. Gli studenti interessati ad immatricolarsi al Corso di laurea in Metodi e Modelli per Data Science devono sostenere una “**prova di valutazione**” per la verifica delle conoscenze, secondo quanto prevede la normativa. Tale prova (che nel seguito chiameremo anche “**test**”) consiste in domande a risposta multipla su argomenti di base di matematica e viene effettuata online mediante apposito form contestualmente alla procedura di immatricolazione.

Qualora la verifica non fosse positiva, come previsto dalla legge devono essere assegnati degli obblighi formativi aggiuntivi da assolvere entro il primo anno. Per il corso di laurea in Metodi e Modelli per Data Science, tali obblighi richiedono il superamento di un esame del primo anno di corso tra quelli riferiti ai settori “MAT” prima di poter sostenere ulteriori esami.

Sono esonerati dal test gli studenti che hanno superato l'esame di stato conclusivo del corso di studio di istruzione secondaria superiore, con un voto pari o superiore a 95/100 (o 57/60). Tutti gli studenti che si immatricolano per la prima volta nell'Università di Roma “Tor Vergata”, ad un corso di studio in cui il titolo di accesso è il diploma di maturità, e abbiano conseguito (presso una scuola italiana) una votazione pari a 100/100 (o 60/60) o siano risultati vincitori delle Olimpiadi Nazionali di Matematica saranno esonerati dal pagamento del contributo universitario per il primo anno e dovranno pagare soltanto l'imposta di bollo e la tassa regionale. Tutti gli studenti che sono vincitori di una medaglia olimpica vengono esonerati dal pagamento delle tasse universitarie per tutto il corso di studio e devono pagare soltanto l'imposta di bollo e la tassa regionale.

IMPORTANTE: Gli studenti esonerati dall'obbligo di sostenere il test per la votazione conseguita all'esame di stato dovranno attivare, preliminarmente, la procedura di registrazione sul sito dei Servizi on-line dell'Ateneo come indicato nell'articolo specifico dell'Avviso. Verranno eseguiti, dal personale della Segreteria Studenti dell'Area Scienze, controlli a campione sulla veridicità delle dichiarazioni rese, e se necessario verranno poste in essere le procedure previste dalla normativa vigente in caso di dichiarazione mendace.

Gli studenti che desiderino ripassare alcuni argomenti o colmare alcune lacune possono seguire un **corso intensivo di Matematica di base**, detto **Matematica 0**, che si terrà a settembre. I dettagli saranno pubblicati appena possibile.

Informazioni. Per informazioni sulla didattica lo studente si può rivolgere alla segreteria del Corso di Laurea, Cristiano Di Meo, dimeo@mat.uniroma2.it, tel. 06 72594685, presso il Dipartimento di Matematica. Le informazioni sono comunque riportate nel sito del Corso di Laurea. Ulteriori informazioni si possono anche ottenere per posta elettronica all'indirizzo dida@mat.uniroma2.it.

Gli studenti acquisiranno nell'ambito dei corsi di base le conoscenze e competenze necessarie nei seguenti argomenti, svolti in insegnamenti fondamentali: Algebra Lineare e Calcolo Matriciale, Calcolo Differenziale e Integrale per funzioni di una e più variabili reali, Probabilità, Equazioni Differenziali Ordinarie, Statistica, Informatica e Tecniche di Programmazione, Gestione di Database, Fisica. A questi corsi si aggiungono un insieme di esami caratterizzanti che coprono ulteriori sviluppi nell'am-

bito dell'Analisi, della Probabilità e della Statistica nonché Analisi Numerica, Ottimizzazione, Calcolo Matriciale anche da un punto di vista computazionale, Algoritmi e Strutture Dati, Machine Learning. L'insieme di questi corsi è in grado di fornire basi estremamente solide per tutti gli aspetti della Data Science. I corsi affini permettono di acquisire competenze nell'ambito della Programmazione Avanzata e Parallela. Fra essi è presente un esame introduttivo all'Analisi Economica, considerando che l'esposizione a questo ambito applicativo può senz'altro accrescere notevolmente l'attrattiva degli studenti per il mondo del lavoro. Sono presenti quindi una grande varietà di corsi per crediti formativi affini e integrativi, con l'opportunità per gli studenti sia di approfondire ulteriori aspetti metodologici relativi all'Intelligenza Artificiale, al Machine Learning, alla Statistica e Probabilità ed ai Metodi Numerici, sia di conoscere sin dal percorso formativo triennale ulteriori ambiti applicativi, in particolare tra le Scienze Fisiche o la Finanza. Una larga parte dei corsi, ed in particolare tutti quelli relativi alla Programmazione, sono ampiamente supportati da attività laboratoriale. Il percorso formativo si conclude con la prova finale, per la preparazione della quale si fornisce un'apposita assistenza didattica. Questa prova non risulta particolarmente onerosa in termini di crediti formativi e può riguardare sia l'approfondimento di aspetti teorici già incontrati durante i corsi, sia lo sviluppo di applicazioni, anche in collaborazione con le imprese con il quale il corso di laurea è in contatto. Ogni insegnamento prevede esercitazioni ed una verifica finale che avviene, di norma, attraverso la valutazione di un elaborato scritto e/o un colloquio orale. In tutto il percorso formativo sono previste attività tutoriali e seminariali mirate, in particolare, ad affinare la capacità di risolvere problemi, a sviluppare autonomia di giudizio e abilità comunicative.

Sbocchi lavorativi

La richiesta di laureati in Metodi e Modelli per Data Science è al momento fortissima anche in ambiti molto diversi tra loro. Tra le molteplici attività professionali menzioniamo le seguenti:

- aziende ad alta tecnologia nei settori dell'Information and Communication Technology;
- aziende ad alta tecnologia in ambito fisico ed ingegneristico che svolgano attività legate ai Big Data ed all'Intelligenza Artificiale, ad esempio nel settore energetico;
- consulenza industriale;
- consulenza scientifica in tutti i campi della ricerca pura e applicata che richiedono la gestione di grandi moli di dati;
- banche e compagnie d'assicurazione per consulenza in ambito finanziario ed assicurativo nel settore pubblico e nel settore privato;
- consulenza in ambito Medico e Biologico, incluse le aziende di ricerca farmaceutica e biotecnologica, nella misura in cui esse utilizzino tecniche di Machine Learning ed Intelligenza Artificiale.

Oltre al diretto ingresso nel mondo del lavoro, il laureato in Metodi e Modelli per Data Science potrà proseguire gli studi nelle Lauree Magistrali, o più in generale in studi di secondo livello, di ambito matematico, statistico, informatico ma anche di ambiti applicativi specifici ove la solida preparazione matematica e statistica e la robusta competenza informatica risultano rilevanti.

Ordinamento degli studi

Sul sito web del Corso di Laurea si trova il Regolamento che con i suoi articoli disciplina e specifica gli aspetti organizzativi del Corso di Laurea.

Piano di studio

Il Corso di Laurea in Metodi e modelli per Data Science prevede un unico curriculum nell'ambito del quale è definito un insieme di moduli didattici obbligatori ed un ampio spazio per le scelte autonome degli studenti.

Nelle tabelle successive la sigla CFU indica i crediti formativi universitari. Ogni CFU vale, convenzionalmente, 25 ore di lavoro (comprendendo le ore di lezione, di esercitazione e il lavoro individuale).

Per i nostri insegnamenti, 1 CFU corrisponde al lavoro necessario per seguire e comprendere 8/10 ore di lezione. Come indicato nel seguito (vedi la descrizione della prova finale), alla fine del corso di studi la media viene calcolata pesando i voti con il numero di CFU del corso a cui si riferiscono. In altre parole, i corsi con molti CFU richiedono più lavoro, ma un buon voto in uno di essi conta di più alla fine. Per potersi laureare lo studente dovrà maturare almeno 180 CFU.

Schema del piano di studio

1° ANNO: Tot. 57 CFU / 7 esami				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Tipo
Algebra e Geometria	6	1	MAT/02	A
Analisi Matematica I	9	1	MAT/05	A
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo I	9	1	INF/01	A
Analisi Matematica II	6	2	MAT/05	B
Basi di Dati	9	2	INF/01	A
Fisica e Analisi Dati	9	2	FIS/01	A
Probabilità I	9	2	MAT/06	A
2° ANNO: Tot. 60 CFU / 7 esami				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Tipo
Algebra lineare e model order reduction	6	1	MAT/03	B
Algoritmi e strutture dati	9	1/2	INF/01	B
Analisi numerica e ottimizzazione numerica	9	1	MAT/08	B
Statistica I	9	1	MAT/06	A
Analisi economica	9	2	SECS-P/01	C
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo II	9	1/2	INF/01	A
Probabilità e Statistica II	9	2	MAT/06	B
3° ANNO: Tot. 63 CFU / 6-8 esami+ una prova di idoneità + prova finale				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Tipo
Algoritmi e Strutture Dati per Big Data	9	1	INF/01	C
Introduzione all'Intelligenza Artificiale e Machine Learning con laboratorio	9	1	INF/01	A
Inglese	4	1	L-LIN/12	
Esami a scelta nel gruppo opzionale	18	-	-	-
Attività a scelta dello studente	18	-	-	-
Prova finale	5	-	-	-

NOTE

A=attività di base, B=attività caratterizzanti, C=attività affini

Il gruppo opzionale è composto, per il 2025/26, dagli insegnamenti classificati come opzionali nella tabella 3° ANNO della **didattica erogata**.

L'esame di **Inglese** può anche essere anticipato al primo anno.

Didattica erogata: elenco degli insegnamenti attivati nell'A.A. 2025/26

1° ANNO				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Obbl/Opz
Algebra e Geometria	6	1	MAT/02	obbligatorio
Analisi Matematica I	9	1	MAT/05	obbligatorio
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo I	9	1	INF/01	obbligatorio
Analisi Matematica II	6	2	MAT/05	obbligatorio
Basi di Dati	9	2	INF/01	obbligatorio
Fisica e Analisi Dati	9	2	FIS/01	obbligatorio
Probabilità I	9	2	MAT/06	obbligatorio

2° ANNO				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Obbl/Opz
Algebra lineare e model order reduction	6	1	MAT/03	obbligatorio
Algoritmi e strutture dati	9	1/2	INF/01	obbligatorio
Analisi numerica e ottimizzazione numerica	9	1	MAT/08	obbligatorio
Statistica I	9	1	MAT/06	obbligatorio
Analisi economica	9	2	SECS-P/01	obbligatorio
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo II	9	1/2	INF/01	obbligatorio
Probabilità e Statistica II	9	2	MAT/06	obbligatorio

3° ANNO				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Obbl/Opz
Algoritmi e Strutture Dati per Big Data	9	1	INF/01	obbligatorio
Introduzione all'Intelligenza Artificiale e Machine Learning con laboratorio	9	1	INF/01	obbligatorio
Inglese	4	1	L-LIN/12	obbligatorio
Analisi di serie temporali	6	2	SECS-S/03	opzionale
Econometria (Inferenza Causale)	6	2	SECS-P/05	opzionale
Grafi e Complex Networks 1+ Grafi e complex Networks 2	6+3	2	MAT/08	opzionale
Machine Learning	6	2	INF/01	opzionale
Metodi di approssimazione per Big Data	9	1	MAT/08	opzionale
Metodi Matematici per la Finanza	9	1	SECS-S/06	opzionale

Didattica programmata: insegnamenti per gli studenti che si immatricolano nell'A.A. 2025/26

1° ANNO: 2025/26				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Obbl/Opz
Algebra e Geometria	6	1	MAT/02	obbligatorio
Analisi Matematica I	9	1	MAT/05	obbligatorio
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo I	9	1	INF/01	obbligatorio
Analisi Matematica II	6	2	MAT/05	obbligatorio
Basi di Dati	9	2	INF/01	obbligatorio
Fisica e Analisi Dati	9	2	FIS/01	obbligatorio
Probabilità I	9	2	MAT/06	obbligatorio

2° ANNO: 2026/27				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Obbl/Opz
Algebra lineare e model order reduction	6	1	MAT/03	obbligatorio
Analisi numerica e ottimizzazione numerica	9	1	MAT/08	obbligatorio
Statistica I	9	1	MAT/06	obbligatorio
Algoritmi e strutture dati	9	1/2	INF/01	obbligatorio
Analisi economica	9	2	SECS-P/01	obbligatorio
Fondamenti di Programmazione e Laboratorio Calcolo II	9	1/2	INF/01	obbligatorio
Probabilità e Statistica II	9	2	MAT/06	obbligatorio

3° ANNO: 2027/28				
Insegnamento	CFU	Semestre	Settore	Obbl/Opz
Algoritmi e Strutture Dati per Big Data	9	1	INF/01	obbligatorio
Introduzione all'Intelligenza Artificiale e Machine Learning con laboratorio	9	1	INF/01	obbligatorio
Inglese	4	1	L-LIN/12	obbligatorio
Analisi di serie temporali	6	-	SECS-S/03	opzionale
Econometria (Inferenza Causale)	6	-	SECS-P/05	opzionale
Informational Retrieval	6	-	INF/01	opzionale
Machine Learning	6	-	INF/01	opzionale
Metodi di approssimazione per Big Data	9	-	MAT/08	opzionale
Metodi Matematici per la Finanza	9	-	MAT/06	opzionale
Metodi Matematici per l'ottimizzazione	9	-	MAT/05	opzionale
Grafi e Complex Networks 1+ Grafi e complex Networks 2	6+3	-	MAT/08	opzionale
Processi Stocastici e Serie Temporali	9	-	MAT/06	opzionale
Topological Data Analysis	9	-	MAT/03	opzionale

Calendario 2025/2026

I corsi hanno generalmente durata semestrale. I corsi del primo semestre 29 settembre 2025 al 16 gennaio 2026, quelli del secondo semestre dal 2 marzo 2025 al 5 giugno 2025. I corsi del primo semestre del primo anno inizieranno il 22 settembre 2025 e avranno una settimana di interruzione delle lezioni dal 10 al 14 novembre 2025. Durante questa settimana si svolgeranno eventuali prove di esonero.

Frequentare le lezioni è considerata una strategia efficace per un percorso formativo di qualità. Permette di conoscere più a fondo gli argomenti trattati e favorisce occasioni di scambio e relazione con i docenti e con i compagni di corso. La vicinanza e il confronto con gli altri consentono, infatti, di reperire informazioni mancanti, correggere i propri errori. Ci si rende conto che non si è soli a sperimentare delle difficoltà e si ha la possibilità di mettere in comune le proprie conoscenze. Partecipare attivamente alla vita universitaria significa anche cogliere le altre opportunità offerte dall'Ateneo: convegni, seminari, giornate di studio, assemblee studentesche, eventi di divulgazione, ecc. aperti agli studenti.

Docenti tutor

Ad ogni studente immatricolato viene assegnato un docente tutor che potrà essere consultato per consigli e suggerimenti generali in merito all'andamento delle attività di studio. Al terzo anno ogni studente ha la possibilità di sostituire il tutor assegnatogli con un diverso docente che lo possa guidare nella scelta dei corsi opzionali a seconda delle proprie inclinazioni. Tutti i docenti dei corsi hanno un orario di ricevimento settimanale per eventuali chiarimenti da parte degli studenti sulla materia insegnata. Il contatto con i professori universitari è improntato su modalità differenti rispetto alla scuola: lo studente dovrà farsi avanti in prima persona se occorre un chiarimento o un consiglio. Se se ne avverte la necessità ci sono sempre tempi e luoghi di contatto sia a lezione sia negli orari di ricevimento. Sul sito web del Corso di Studio, nella sezione tutoring, si potrà consultare l'elenco studenti – docenti tutor.

Esami

Gli insegnamenti del primo semestre prevedono due appelli di esame nella sessione estiva anticipata (febbraio), due appelli nella sessione estiva (giugno-luglio) e due appelli in quella autunnale (settembre). I corsi del secondo semestre prevedono due appelli d'esame nella sessione estiva, due in quella autunnale e due in quella invernale (febbraio). Il calendario degli esami è pubblicato nella sezione apposita del sito web del Corso di Studio. Lo studio universitario ha caratteristiche differenti da quello delle superiori. Le insicurezze collegate alla preparazione personale si attenuano notevolmente dopo aver sostenuto con successo i primi esami. Tuttavia nessun metodo di studio può garantire buoni risultati senza che lo studente ci dedichi tempo e impegno. Si può rendere l'apprendimento più organico, duraturo e appagante, ma nessun sistema può produrre risultati istantanei e senza sforzo.

Valutazione

Il punteggio della prova d'esame, ove presente, è attribuito mediante un voto espresso in trentesimi. La prova di esame sarà valutata secondo i seguenti criteri: Non idoneo: importanti carenze e/o inaccuratezza nella conoscenza e comprensione degli argomenti; limitate capacità di analisi e sintesi.

- 18-20: conoscenza e comprensione degli argomenti appena sufficiente con possibili imperfezioni; capacità di analisi sintesi e autonomia di giudizio sufficienti.
- 21-23: conoscenza e comprensione degli argomenti routinaria; capacità di analisi e sintesi corrette con argomentazione logica coerente.
- 24-26: discreta conoscenza e comprensione degli argomenti; buone capacità di analisi e sintesi con argomentazioni espresse in modo rigoroso.

- 27-29: conoscenza e comprensione degli argomenti completa; notevoli capacità di analisi, sintesi. Buona autonomia di giudizio.
- 30-30L: ottimo livello di conoscenza e comprensione degli argomenti. Notevoli capacità di analisi e di sintesi e di autonomia di giudizio. Argomentazioni espresse in modo originale.

Piani di studio

Entro il mese di novembre, gli studenti iscritti al terzo anno devono presentare al Coordinatore del Corso di Laurea un piano di studio, in cui indicano le proprie scelte relativamente alla parte opzionale del corso di studi. Il Coordinatore del Corso di Laurea sottopone i piani di studio all'approvazione del Consiglio del Dipartimento di Matematica. Gli studenti possono eventualmente apportare modifiche al piano di studio. In tal caso, devono sottoporre un nuovo piano di studio e richiederne l'approvazione.

Si ricorda che lo schema di piano di studio riportato sul sito consente di accumulare i crediti necessari per laurearsi con non più di 20 verifiche di profitto (ovvero 19 esami più la parte delle attività a scelta del piano di studio) come previsto dal DM 270/04.

Prova finale

La prova finale per il conseguimento della Laurea in Metodi e Modelli per Data Science richiede la preparazione e redazione di una tesi, frutto di un lavoro del laureando svolto sotto la guida di un relatore e una dissertazione conclusiva.

La tesi, che può essere redatta anche in lingua inglese, previo consenso del relatore e approvazione del Coordinatore, viene discussa e valutata nella seduta di laurea.

In relazione ad obiettivi specifici, e nel quadro di convenzioni che lo prevedano esplicitamente, lo svolgimento della tesi può essere effettuato mediante tirocini formativi presso aziende, strutture della pubblica amministrazione ed enti esterni, oltre che nell'ambito di soggiorni di studio presso altre università italiane ed estere, anche nel quadro di accordi internazionali. Le sedute di laurea si svolgono di norma in cinque appelli annuali, nell'arco di tre sessioni (estiva, autunnale, invernale). La Commissione esprime un voto in centodecimali, con eventuale lode decisa all'unanimità. Per la formazione del voto di laurea, la commissione calcola, anzitutto, la media dei voti, valutati in trentesimi e pesati secondo i crediti, delle attività formative che prevedono valutazione di profitto. Il punteggio derivante da tale media, convertito in centodecimali, può essere incrementato di al più 7 punti per la tesi, la relativa discussione e la carriera didattica dello studente.

Modalità di erogazione della didattica

La didattica si svolge in **presenza e la frequenza è fortemente consigliata**. Come supporto alla didattica, per la larga maggioranza degli insegnamenti, i docenti sono disponibili ad utilizzare le classi virtuali Teams per scambio di materiale, contatti con gli studenti, ricevimento e altro. Inoltre, alcuni docenti sono anche disponibili, su motivata richiesta degli studenti e subordinatamente alla disponibilità di strumenti adeguati ed efficienti, ad effettuare streaming e/o registrazione delle lezioni. Si ribadisce tuttavia che **lo streaming e/o la registrazione delle lezioni possono essere intesi unicamente come supporto collaterale alla didattica svolta in aula e non possono in alcun modo essere considerati come sostituto sistematico per essa**.

Programmi dei corsi (didattica erogata 2025/26)

Per ogni insegnamento si vedano anche le voci insegnamenti e didattica erogata del sito web del Corso di Laurea.

ALGEBRA E GEOMETRIA

1° anno – 1° semestre

6 CFU – settore MAT/02 – 60 ore di lezione in aula

Docente: F. Carocci (codocente S. Scaramuccia)

 **Programma:** Vettori in $\mathbb{R}^n$, somma di vettori e prodotto per scalare. Prodotto scalare, distanza. Eliminazione di Gauss, matrici a scala. Soluzione di un sistema lineare. Matrici e sistemi lineari. Spazi vettoriali, sottospazi vettoriali. Combinazioni lineari, basi, dimensioni, coordinate. Esistenza delle basi. Somma diretta e formula di Grassmann. Equazioni parametriche e cartesiane. Applicazioni lineari e matrici associate. Nucleo, immagine, teorema della dimensione. Matrici invertibili, matrice inversa con l'algoritmo di Gauss simultaneo. Matrice di cambiamento di base. Determinante, teorema di Binet, formula di Cramer. Inversa col metodo dell'aggiunta. Rango, teorema di Rouché-Capelli. Caratterizzazioni equivalenti delle matrici invertibili. Basi ortogonali e ortonormali, procedimento di Gram-Schmidt. Proiezioni ortogonali, ortogonale di un sottospazio. Matrici ortogonali. Autovalori e autovettori, diagonalizzazione.

Obiettivi di apprendimento: L'insegnamento si propone di fornire le nozioni di base dell'algebra lineare nonché geometria analitica.

Testi consigliati:

M. Abate, C. de Fabritiis: *Geometria analitica con elementi di algebra lineare*, 3a ed., McGraw-Hill, 2015

Modalità di esame: Esame scritto: risoluzione autonoma di esercizi. Esame orale: esposizione rigorosa di argomenti del corso.

Bibliografia di riferimento:

M. Abate, C. de Fabritiis: *Geometria analitica con elementi di algebra lineare*, 3a ed., McGraw-Hill, 2015

E. Sernesi: *Geometria I*, Boringhieri, 2000

F. Orecchia: *Lezioni di geometria I*, Aracne, 2000

L. A. Lomonaco: *Geometria e algebra*, Aracne, 2013

M. R. Casali, C. Gagliardi, L. Grasselli: *Geometria*, Esculapio, 2016

C. Carrara: *Esercizi di algebra lineare*, Online (<http://www.science.unitn.it/~carrara/eserciziario/>)

 **Program:** Vectors in $\mathbb{R}^n$, sum of vectors and scalar multiplication. Scalar product, distance, Gauss elimination, matrices in echelon form. Solution of a linear system. Matrices and linear systems. Vector spaces, vector subspaces. Linear combination, basis, dimension, coordinates. Existence of a basis. Direct sum and Grassmann formula. Parametric and cartesian equations. Linear maps and associated matrices. Kernel, Image, rank-nullity theorem. Invertible matrices, inverse matrix with Gaussian elimination. Change of basis matrix. Determinant, Binet theorem, Cramer formula. Inverse matrix with the adjoint matrix. Rank, Rouché-Capelli theorem. Equivalent characterizations of invertible matrices. Orthogonal and orthonormal bases, Gram-Schmidt method. Orthogonal projections, orthogonal of a subspace. Orthogonal matrices. Eigenvalues and eigenvectors, diagonalization.

Learning objectives: The course aims to provide the basic notions of linear algebra as well as analytic geometry.

Text books:

Abate, de Fabritiis: *Geometria analitica con elementi di algebra Lineare*, 3a ed., McGraw-Hill, 2015

Exam mode: Written part: independent solution of exercises. Oral part: rigorous exposition of some topics of the course.

Reference bibliography:

Abate, de Fabritiis: *Geometria analitica con elementi di algebra Lineare*, 3a ed., McGraw-Hill, 2015

Sernesi: *Geometria I*, Boringhieri, 2000

Orecchia: *Lezioni di geometria I*, Aracne, 2000

Lomonaco: *Geometria e algebra*, Aracne, 2013

Casali, Gagliardi, Grasselli: *Geometria*, Esculapio, 2016

Carrara: *Esercizi di algebra lineare*, Online (<http://www.science.unitn.it/~carrara/eserciziario/>)

ALGEBRA LINEARE E MODEL ORDER REDUCTION

2° anno – 1° semestre

6 CFU – settore MAT/03 – 60 ore di lezione in aula

Docente: M. Fiacchi (codocente C. Manni)

 **Programma:** Operatori lineari su spazi vettoriali finito dimensionali e matrici associate. Forme bilineari. Prodotti scalari e Hermitiani. L'aggiunto di un operatore lineare. Operatori normali. Il teorema spettrale. Vettori ciclici e sottospazi invarianti. Il polinomio minimo. La forma normale di Jordan di una matrice. Classi di matrici: matrici ortogonali, matrici unitarie, matrici (semi)definite positive. Forma normale di Schur. Decomposizione polare. Valori singolari. Norme matriciali. Numero di condizionamento di una matrice. Minimi quadrati discreti. Equazioni normali. Fattorizzazioni di Cholesky e QR per il calcolo della soluzione ai minimi quadrati. Decomposizione ai valori singolari (SVD). Pseudoinversa di Moore-Penrose. SVD troncata e Principal Component Analysis (PCA) con applicazioni numeriche alle immagini.

Obiettivi di apprendimento: L'insegnamento si propone di fornire le conoscenze teoriche fondamentali riguardo alle proprietà spettrali delle matrici con particolare riguardo al concetto, al significato ed all'utilizzo degli autovalori e dei valori singolari come strumento di analisi dati nell'ambito della riduzione della dimensionalità.

Testi consigliati:

Bini, Capovani, Menchi: *Metodi numerici per l'algebra lineare*, Zanichelli

Golub, Van Loan: *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press

Modalità di esame: Prova scritta e orale.

 **Program:** Linear operators on finite dimensional vector spaces and associated matrices. Bilinear forms. Scalar and Hermitian products. Adjoint operators. Normal operators. Spectral theorem. Cyclic vectors and invariant subspaces. Minimal polynomial. Jordan normal form. Classes of matrices: orthogonal, unitary, (semi)positive definite. Schur normal form. Polar decomposition. Singular values. Matrix norms. Condition number of a matrix. Discrete least squares. Normal equations. Cholesky and QR factorizations for computing the least squares solution. Singular Value Decomposition (SVD). Moore-Penrose pseudoinverse. Truncated SVD and Principal Component Analysis (PCA) with numerical applications to images.

Learning objectives: The course aims to provide the fundamental theoretical knowledge about the spectral properties of matrices with particular regard to the concept, meaning and use of eigenvalues and singular values as a tool for data analysis in the context of dimensionality reduction.

Text books:

Bini, Capovani, Menchi: *Metodi numerici per l'algebra lineare*, Zanichelli

Golub, Van Loan: *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press

Exam mode: Written and oral exam.

ALGORITMI E STRUTTURE DATI

2° anno – 1/2° semestre

9 CFU – settore INF/01 – 90 ore di lezione in aula

Docente: L. Gualà

 **Programma:** Il corso riguarda l'analisi e la progettazione di algoritmi. L'enfasi è sugli algoritmi efficienti. Saranno presentati i principali strumenti teorici utili per l'analisi e le principali tecniche di progettazione algoritmica (tecnica greedy, divide-et-impera, programmazione dinamica). Il corso è diviso in due parti. La prima parte copre: notazione asintotica, diversi metodi per stimare la complessità computazionale di algoritmi ricorsivi, il problema dell'ordinamento, strutture dati efficienti per implementare dizionari e code con priorità, e il problema del calcolo della distanza di edit fra due parole. La seconda parte riguarda problemi e algoritmi su grafi. Saranno presentati algoritmi efficienti per visitare un grafo, calcolare cammini minimi (in grafi pesati), trovare un minimo albero di copertura, e calcolare il flusso massimo di una rete con vincoli di capacità sugli archi.

Obiettivi di apprendimento: Questo corso introduce gli studenti all'analisi e alla progettazione di algoritmi.

Testi consigliati:

Demetrescu, Finocchi: *Algoritmi e Strutture Dati*, McGraw-Hill

Kleinberg, Tardos: *Algorithm Design*, Addison Wesley, 2005

Modalità di esame: Prova scritta e orale.

 **Program:** The course is about analysis and design of algorithms. The emphasis is on efficient algorithms. We present the main theoretical tools used to analyze algorithms and the main design techniques (greedy, divide-and-conquer, dynamic programming). The course is divided into two parts. The first part covers: asymptotic notation, several methods to bound the computational complexity of recursive algorithms, sorting, efficient data structures for dictionaries and priority queues, and the problem of computing the edit distance between two words. The second part is about graph problems and algorithms. We show how to efficiently visit a graph, compute shortest paths (in weighted graphs), find a minimum spanning tree, and compute a maximum flow of a network with capacity constraints on edges.

Learning objectives: This course introduces students to the analysis and design of algorithms.

Text books:

Demetrescu, Finocchi: *Algoritmi e Strutture Dati*, McGraw-Hill

Kleinberg, Tardos: *Algorithm Design*, Addison Wesley, 2005

Exam mode: Written and oral exam.

ALGORITMI E STRUTTURE DATI PER BIG DATA

3° anno – 1° semestre

9 CFU – settore INF/01 – 90 ore di lezione in aula

Docente: A. Clementi (codocente D. Croce)

 **Programma:** vedere versione inglese

Obiettivi di apprendimento: Il corso ha come obiettivi l'apprendimento dei principali metodi e strumenti algoritmici per l'analisi e la gestione efficiente di enormi quantità di dati. In particolare, si studiano ed implementano modelli dinamici (streaming, avversariali e gerarchici) per la rappresentazione dei dati e la realizzazione di strutture dati che permettono queries di natura statistica/combinatoria in modo efficiente sia come costi di memoria che come tempo di esecuzione. Istanze importanti di queste strutture che si studieranno sono le Locality Hasing Function, il Min-Hashing, la Shingling Technique, i modelli di dati Streaming, il sampling su streaming, gli algoritmi randomizzati di counting, e l'algoritmo di page-rank per il WEB. Verranno anche studiati modelli e tecniche parallele su Map-Reduce.

Testi consigliati:

Leskovec, Rajaraman, Ullmann: *Mining of Massive Data Sets*, Cambridge University Press, 2020

Mitzenmacher, Upfal: *Probability and Computing*, Cambridge University Press

Kleinberg, Tardos : *Algorithm Design*, Pearson Education Limited, 2013

Blum, Hopcroft, Kannan : *Foundations of Data Science*, Cambridge University Press, 2020

Modalità di esame: Prova orale e progetto.

 **Program:**

PART A: Probability and Computing. Randomized Algorithms for Big Data. Basic Notions of Probability, Verifying Polynomial Identities, Verifying Matrix Multiplications, Contention Resolutions, Randomized Quick-Sort, Randomized Algorithms for Computing the Median Randomized Hash Functions, and Hash Table.

PART B: Data Mining. A Short Overview. Finding Similar Items. Applications of Set Similarity. Shingling of Documents. Similarity-preserving Summaries of Sets. Locality Sensing Hashing for Documents. Mining Data Streams. The Stream Data Model. Pattern Matching: Karp-Rabin's Algorithm. Sampling Data in a Stream. Filtering Stream. Counting Distinct Elements in a Stream. Estimating Moments of a Stream. Random Walks. Page Rank Algorithms for the WEB.

Learning objectives: The main learning goal of the course is the study of models and algorithmic tools for the management and analysis (mining) of large sets of data (Big Data). In particular, the course focuses on dynamic digital models (streaming, adversarial, hierarchical) for the raw input data and describe

advanced data structures that allow space/time efficient combinatorial and statistical queries. Typical examples of such structures that will be described are: Locality Sensitive Hashing, Shingling Technique, Data Streaming, Sampling over Data Streaming, probabilistic counting, Page-Rank algorithm for WEB Information Retrieval. It will also give an introduction to fast parallel techniques on the Map-Reduce Architecture.

Text books:

Leskovec, Rajaraman, Ullmann: *Mining of Massive Data Sets*, Cambridge University Press, 2020

Mitzenmacher, Upfal: *Probability and Computing*, Cambridge University Press

Kleinberg, Tardos : *Algorithm Design*, Pearson Education Limited, 2013

Blum, Hopcroft, Kannan : *Foundations of Data Science*, Cambridge University Press, 2020

Exam mode: Project and oral exam.

ANALISI DI SERIE TEMPORALI

3° anno – 2° semestre

6 CFU – settore SECS-S/03 – 48 ore di lezione in aula

Docente: M. Brunetti

 **Programma:** Regressione lineare, semplice e con regressori multipli. Assunzioni del modello lineare. Diagnostica. Inferenza. Valutazione di studi basati sulla regressione. Regressioni per serie storiche e previsioni. Effetti causali dinamici.

Obiettivi di apprendimento: il corso fornisce le basi dell'analisi statistica ed econometrica di dati sezionali e serie storiche, evidenziandone le potenzialità applicative in ambito economico e finanziario. Si presenta il modello di regressione lineare, nella sua versione semplice e con più regressori, e lo stimatore dei Minimi Quadrati Ordinari, con relative assunzioni e proprietà. Con riferimento alle serie storiche, il corso introduce le nozioni di autocorrelazione, di non-stazionarietà e di eteroschedasticità, analizzandone le conseguenze in termini di stima di modelli di regressione e illustrando le strategie necessarie per tenerne conto nelle analisi di regressione.

Testi consigliati:

James H. Stock and Mark W. Watson: *Introduzione all'Econometria*, 5a ed., Pearson, 2020

Modalità di esame: Prova scritta. La struttura dell'esame include domande, sia di natura teorica che di natura empirica, in formato aperte, chiuse e/o a risposta multipla, volte a valutare sia la conoscenza delle nozioni teoriche fornite durante il corso, sia la capacità di applicarle a dati reali. Alcune domande includeranno rappresentazioni grafiche ed output di stima del software statistico utilizzato, al fine di valutare la comprensione delle stesse e la capacità interpretativa acquisite dallo studente.

 **Program:** Linear Regression Model, both simple and with multiple regressors. Assumptions and Diagnosis. Inference. Internal and External Validity. Regression Analysis of Economic Time Series Data. Dynamic Causal Effects.

Learning objectives: The course lays the fundamentals for the statistical and econometric analysis of both sectional and time series data, highlighting the potential applications to economic and financial research questions. Contents cover the Linear Regression Model, in both simple and multiple specification, with its assumptions and properties. As for the time-series analysis, the course introduces the notions of auto-correlation, heteroskedasticity and non-stationarity, analysing the consequences in terms of model estimation outcomes and illustrating how to properly deal with those features in the data analysis.

Text books:

James H. Stock and Mark W. Watson: *Introduction to Econometrics*, fifth edition, Pearson, 2020

Exam mode: Written exam. The final written exam is a closed-book exam, consisting of both theoretical and empirical questions covering the entire program of the course. Questions can be both open and multiple choice and can feature graphs and estimation output, with the aim to evaluate the ability of the student to interpret the final results of a real-world dataset.

ANALISI ECONOMICA

2° anno – 2° semestre

Docente: D. Vuri

 **Programma:** 1. Introduzione al corso: causalità e correlazione, consumatori e imprese, economia teorica ed economia empirica. 2. Domanda e offerta. Salario minimo. Welfare economics. 3. Elasticità della domanda e dell'offerta. Causalità verso correlazione nell'elasticità. Come misurare l'elasticità. Esempio: l'assicurazione sanitaria negli US. Altri tipi di elasticità. 4. Teoria del consumatore: preferenze e curve di indifferenza. Funzione di utilità e utilità marginale. Il saggio marginale di sostituzione (SMS) e SMS con diverse funzioni di utilità. 5. Il vincolo di bilancio. Le scelte vincolate. La scelta ottima. Soluzione interna e soluzione ad angolo. Scelte intertemporali. 6. Un'applicazione dell'analisi della curva di domanda: i food stamp. La curva di domanda. Spostamenti della curva di domanda. Effetto reddito ed effetto sostituzione. Variazione compensativa. 7. La scelta tra lavoro e tempo libero. Vincolo di bilancio. Scelta ottima. Curva di offerta di lavoro. Uno sguardo alla storia. 8. Un'applicazione: l'offerta di child labor in Vietnam. 9. Teoria della produzione. Definizioni. Il Prodotto marginale del lavoro. Prodotto medio e prodotto marginale. Isoquanti di produzione. Rendimenti di scala. 10. Teoria della produzione. Costi medi e costi marginali. Costi di BP e LP. Gli isocosti. La scelta efficiente. Curve di domanda. Elasticità della domanda. Minimizzazione dei costi di BP. 11. La concorrenza perfetta e la max del profitto. 12. Concorrenza perfetta: la condizione di chiusura. La curva di offerta dell'impresa e di mercato. L'equilibrio di lungo periodo e il numero di imprese. L'equilibrio di mercato nel LP. Curva di offerta per industria a costi costanti, crescenti e decrescenti. 13. I problemi di agenzia. Il surplus del consumatore. 14. Surplus di mercato ed equilibrio. Surplus del produttore. Deadweight loss. Esempio: il mercato dei tassisti. 15. Il monopolio. L'effetto avvelenamento. L'equilibrio del monopolista. L'indice di Lerner. L'effetto del monopolio su welfare. Discriminazione di prezzo di I, II e III grado. 16. Monopolio naturale. Governo e monopolio naturale. Contestable markets. 17. Oligopolio. Teoria dei giochi (cenni). Equilibrio di Nash. Modello di Cournot. 18. Modello di Bertrand. Modello di Stackelberg. Equilibrio economico generale (cenni). 19. L'economia dell'informazione. Asimmetria informativa. Moral Hazard. Varie applicazioni. 20. Beni pubblici. 21. L'intervento dello Stato nell'economia.

Obiettivi di apprendimento: il corso fornisce un'introduzione all'analisi economica. Il corso affronta sia la microeconomia - l'analisi delle scelte effettuate dalle singole unità decisionali (famiglie e imprese) - sia la macroeconomia - l'analisi dell'economia nel suo complesso. Il corso esamina, inoltre, il ruolo della politica economica.

Testi consigliati:

D. Acemoglu, D. Laibson, J. A. List: *Microeconomia*, Person

Modalità di esame: La prova di esame valuta la preparazione complessiva dello studente, la capacità di integrazione delle conoscenze delle diverse parti del programma e la capacità analitica. Inoltre, vengono valutate: 1. Conoscenza e capacità di comprensione (knowledge and understanding); 2. Capacità di applicare la conoscenza e comprensione (applying knowledge and understanding); 3. Autonomia di giudizio (making judgements); 4. Capacità di apprendimento (learning skills). Per la verifica dell'apprendimento è previsto il sostenimento di una prova scritta. La prova scritta consiste in 10 domande a risposta multipla per la parte di teoria e 3 esercizi per la parte applicativa. Per ogni domanda a risposta multipla il candidato dovrà scegliere tra quattro risposte. Ogni risposta corretta vale un punto, ogni risposta sbagliata sottrae 0.3. Una risposta non fornita non attribuisce e non sottrae punti. La durata della prova è di 1,20 ore. Le prove si basano sui testi e i materiali indicati, senza differenze tra studenti frequentanti e non frequentanti. Coloro che avranno totalizzato un voto inferiore o uguale a 15 dovranno osservare il salto di appello nella sessione estiva. Nella sessione invernale si potrà sostenere l'esame una sola volta se al primo appello si totalizza un voto inferiore a 15.

 **Program:** 1. Introduction to the course: causality and correlation, consumers and firms, theoretical economics and empirical economics. 2. Demand and supply. Minimum wage. Welfare economics. 3. Elasticity of supply and demand. Causality towards correlation. How to measure elasticity. Example: health insurance in the US. Other types of elasticity. 4. Consumer theory: preferences and indifference curves. Utility function and marginal utility. The marginal rate of substitution (SMS) and SMS with different utility functions. 5. The budget constraint. The constrained choices. The optimal choice. Internal solution and corner solution. Intertemporal choices. 6. An application of the analysis of the demand curve: food stamps. The demand curve. Shifts in the demand curve. Income effect and substitution effect. Compensating variation. 7. The choice between work and leisure. Supply curve. A look at history. 8. An application: the child labor offer in Vietnam. 9. Production theory. Definitions. The marginal product of work. Average product and marginal product. Production quantities. Scale returns. 10. Theory of

production. Average costs and marginal costs. Costs of BP and LP. The isocosts. The optimal choice. Demand curves. Elasticity of demand. Minimization of BP costs 11. Perfect competition and the profit maximization. 12. Perfect competition: the closure condition. The supply curve of the company and the market. The long-term equilibrium and the number of firms. The market equilibrium in the LP. Supply curves for industry at constant, increasing and decreasing costs. 13. Agency problems. Consumer surplus. 14. Market surplus and equilibrium. Producer surplus. Deadweight loss. Example: the taxi driver market. 15. The monopoly. The poisoning effect. The equilibrium of the monopolist. Lerner's index. The effect of the monopoly on welfare. Price discrimination of I, II and III degree. 16. Natural monopoly. The State and natural monopoly. Contestable markets. 17. Oligopoly. Game theory (outline). Nash equilibrium. Cournot model. 18. Bertrand model. Stackelberg model. General equilibrium (outline). 19. The information economy. Information asymmetry. Moral Hazard. Various applications. 20. Public goods. 21. The intervention of the State in the economy.

Learning objectives: The aim of the course is to introduce and develop the crucial methods and concepts of the modern microeconomic theory. To this end, the students will be introduced to the set of notions, concepts and problems that relate to the real world with regard to the main aspects of the microeconomics. The course aims to provide students with the tools that are fundamental for any further economic teaching (Macroeconomics, Game Theory, Public Economics, Industrial Economics, etc). During the course, the behaviors of two types of economic agents, consumers and firms, will be analyzed separately. Then the interaction between economic agents in the context of different market structures (perfect competition, monopoly, oligopoly) will be discussed, and finally, general economic equilibrium, an introduction to game theory, the theory of information asymmetries and public goods will be discussed. During the course a practice session (one per week) will be held, with two purposes: (i) reviewing the topics studied in class; (ii) give a more applied content to the course, through examples of optimizing behavior of consumers and firms who are faced with consumption and production decisions, respectively, and examples of the market outcome of these decisions (equilibrium).

Text books:

D. Acemoglu, D. Laibson, J. A. List: *Microeconomia*, Person

Exam mode: The exam evaluates the overall preparation of the student, the ability to integrate the knowledge of the different parts of the program, and the analytical ability. Furthermore, in compliance with the Dublin descriptors, 1. Knowledge and understanding; 2. Ability to apply knowledge and understanding; 3. Making judgments; 4. Learning skills; are evaluated. The exam consists of a written test. Those who have scored a grade lower than or equal to 15 are required to skip the exam in the summer session. In the winter session the student is required to take the exam only once if she/he scores less than 15 on the first exam. The written test consists of 10 multiple choice questions for the part of theory and 3 exercises for the application part. For each multiple choice question the candidate chooses between four answers. Every correct answer is worth one point, every wrong answer subtracts a third of a point. An answer not provided does not attribute or subtract points. Time: 1.20 hours. The exams are based on the books and slides provided during the course, without distinctions between attending and not attending students.

ANALISI MATEMATICA I

1° anno – 1° semestre

9 CFU – settore MAT/05 – 90 ore di lezione in aula – ulteriori ore di tutorato

Docente: S. Carpi (codocente Y. Tanimoto)

Programma: Numeri naturali, interi e razionali, numeri reali: proprietà e costruzione a partire dai numeri naturali. Estremo superiore ed estremo inferiore. Numeri complessi. Concetto di funzione. Funzioni monotone. Funzioni invertibili. Funzione inversa. Logaritmo. Insiemi aperti e chiusi e loro proprietà. Definizione di successione. Successioni monotone. Limiti di funzioni di successioni. Insiemi compatti. Numero di Nepero: "e". Infiniti e infinitesimi. Limiti notevoli. Funzioni continue. Punti di discontinuità. Asintoti verticali, orizzontali ed obliqui. Serie numeriche e loro convergenza. Continuità della funzione composta e della funzione inversa. Proprietà delle funzioni continue ed invertibili sugli intervalli e sui compatti. Teorema di esistenza degli zeri. Metodo di bisezione e teorema di Weierstrass sui massimi e minimi delle funzioni continue sui compatti. Derivata di una funzione. Derivata della funzione composta e della funzione inversa. Teoremi di Rolle, Lagrange, Cauchy, Hospital. Studio del grafico di funzioni reali di variabile reale; funzioni convesse; Formula di Taylor e sue applicazioni. Integrale di

Riemann. Teorema fondamentale del calcolo integrale. Funzioni primitive e integrali indefiniti. Integrali per sostituzione e per parti; calcolo di aree. Integrali impropri; criteri di integrabilità; criterio di confronto fra serie e integrali impropri.

Obiettivi di apprendimento: Completa e profonda comprensione degli argomenti del corso, con la capacità sia di risolvere problemi, sia di presentare enunciati e dimostrazioni di tutti i risultati in maniera corretta e comprendendo perché le ipotesi sono necessarie. Lo studente deve acquisire un'assimilazione matura dei contenuti ed essere in grado di applicarli ai corsi correlati.

Testi consigliati:

M. Bertsch, R. Dal Passo, L. Giacomelli: *Analisi Matematica*, McGraw Hill

C. Canuto, A. Tabacco: *Mathematical Analysis I*, Springer, 2015

Modalità di esame: È prevista una prova intermedia, sia a scopo di orientamento sia di accertamento del profitto. L'esame finale avviene attraverso una prova scritta ed una orale.

 **Program:** Natural numbers, integers, rational and real numbers: properties and construction starting with natural numbers: least upper bound and greater lower bound. Complex numbers. Functions. Monotonic functions. Invertible functions and their inverse. Exponential and logarithm. Open and closed sets and their properties. Sequences. Limits of functions and of sequences. Compact sets. The Napier number: "e". Infinite and infinitesimal quantities. Examples of limits. Continuous functions. Classification of discontinuities. Vertical, horizontal and oblique asymptotes. Continuity of composition and of inverse. Properties of continuous invertible functions defined on intervals or on compact sets. Existence of zeros of continuous functions. The bisection method and Weierstrass theorem for extreme points of continuous functions on compacta. The derivative. Derivative of composite and inverse functions. Theorems of Rolle, Lagrange, Cauchy and Hospital. Analysis of the graph of a function. Convex functions. Taylor expansion (polynomials and series). The Riemann integral. The fundamental theorem of calculus. The antiderivative. Indefinite integrals. Integration by parts. Integration by substitution. Computing areas. Improper integrals and integrability criteria. Relations between series and improper integrals.

Bibliografia di riferimento:

M. Bertsch, A. Dall'Aglio, L. Giacomelli: *Epsilon 1, prima edizione*, McGraw-Hill, 2021

Learning objectives: Full and complete understanding of the course's topics. The students must be able to solve problems and to present all statements and proofs in full detail, and have a clear understanding of why the assumptions are needed. This understanding must be acquired in depth, with the capability of applying the contents to the contents of related courses.

Text books:

M. Bertsch, R. Dal Passo, L. Giacomelli: *Analisi Matematica*, McGraw Hill

C. Canuto, A. Tabacco: *Mathematical Analysis I*, Springer, 2015

Exam mode: During the course the students take an intermediate test, both for the purpose of bringing to evidence the parts of the syllabus that they don't understand in full and for evaluation. The final exam is based upon a written test and a colloquium.

Reference bibliography:

M. Bertsch, A. Dall'Aglio, L. Giacomelli: *Epsilon 1, prima edizione*, McGraw-Hill, 2021

ANALISI MATEMATICA II

1° anno – 2° semestre

6 CFU – settore MAT/05 – 60 ore di lezione in aula

Docente: A. Braides

 **Programma:** Limiti e calcolo differenziale per funzioni di più variabili reali. Funzioni definite implicitamente. Integrali curvilinei e forme differenziali. Integrali multipli.

Obiettivi di apprendimento: Impadronirsi degli strumenti di calcolo per funzioni di più di una variabile.

Testi consigliati:

M. Bertsch, R. Dal Passo, L. Giacomelli: *Analisi Matematica*, McGraw Hill

Modalità di esame: Prova scritta con esercizi. Orale con domande su esercizi e questioni teoriche.

 **Program:** Limits and differential calculus for functions of several real variables. Implicitly defined functions. Curvilinear integrals and differential forms. Multiple integrals.

Learning objectives: Mastering Calculus for functions of more than one variable.

Text books:

M. Bertsch, R. Dal Passo, L. Giacomelli: *Analisi Matematica*, McGraw Hill

Exam mode: Written test with exercises. Oral exam with questions on exercises and theoretical questions.

ANALISI NUMERICA E OTTIMIZZAZIONE NUMERICA

2° anno – 1° semestre

9 CFU – settore MAT/08 – 90 ore di lezione in aula

Docente: C. Manni (codocente C. Di Fiore)

 **Programma:** Il corso illustra i principi della traduzione di modelli matematici in problemi aritmetici risolubili con mezzi automatici. Aritmetica in virgola mobile e analisi dell'errore. Algebra lineare numerica: metodi diretti e metodi iterativi per sistemi lineari. Approssimazione di soluzioni di equazioni non lineari. Approssimazione e interpolazione polinomiale e splines. Metodi numerici per la minimizzazione di funzioni reali.

Obiettivi di apprendimento: L'insegnamento si propone di fornire le conoscenze di base delle problematiche numeriche legate alla risoluzione di problemi matematici tramite un elaboratore elettronico digitale e di fornire le basi per la programmazione di algoritmi matematici attraverso un linguaggio orientato al calcolo scientifico. Al termine dell'insegnamento, lo studente conoscerà i metodi numerici elementari per l'algebra lineare numerica e l'approssimazione di dati e funzioni e per l'ottimizzazione numerica, sarà in grado di individuare le possibili fonti di errore nell'utilizzo di algoritmi numerici per l'approssimazione di semplici problemi matematici e di interpretare i risultati ottenuti mediante la programmazione di algoritmi relativi tramite l'utilizzo di un elaboratore elettronico digitale.

Testi consigliati:

Bini, Capovani, Menchi: *Metodi Numerici per l'Algebra Lineare*, Zanichelli, 1988

Quarteroni, Sacco, Saleri: *Matematica Numerica*, Springer, 2008

Nocedal, Wright: *Numerical Optimization*, Springer, 1999

Modalità di esame: La valutazione dello studente prevede una prova scritta ed una prova orale. La prova scritta è propedeutica alla prova orale. In essa vengono proposti esercizi concernenti la risoluzione di semplici problemi numerici tramite i metodi studiati. Lo studente dovrà dimostrare di saper riconoscere gli ambiti di applicabilità dei metodi e delle procedure descritte a lezione e applicare gli stessi al fine di risolvere e modellizzare semplici problemi. Nella prova orale lo studente dovrà dimostrare di saper illustrare, sia in modo sintetico che analitico, e con proprietà di linguaggio, i fondamenti matematici dei metodi numerici presentati a lezione.

 **Program:** The course illustrates the principles of translating mathematical models into arithmetic problems solved by automatic means. Floating point arithmetic and error analysis. Numerical linear algebra: direct methods and iterative methods for linear systems. Approximation of solutions of non-linear equations. Polynomial and splines approximation and interpolation. Numerical methods for minimization of real functions.

Learning objectives: The course aims to provide the basic knowledge of numerical issues related to the resolution of mathematical problems through a digital computer and to provide the basis for the programming of the related mathematical algorithms. At the end of the course, the student will know the most basic numerical methods for the numerical linear algebra, the approximation of data and functions and the numerical optimization, he/she will be able to identify the possible sources of error in the use of numerical algorithms for the approximation of simple mathematical problems and to interpret the results obtained by programming relative algorithms using a digital computer.

Text books:

Bini, Capovani, Menchi: *Metodi Numerici per l'Algebra Lineare*, Zanichelli, 1988

Quarteroni, Sacco, Saleri: *Matematica Numerica*, Springer, 2008

Nocedal, Wright: *Numerical Optimization*, Springer, 1999

Exam mode: The student's assessment includes a written exam and an oral exam. The written exam is preparatory to the oral exam. It contains exercises concerning the resolution of simple numerical problems through the studied methods. The student has to prove to be able to recognize the range of

applicability of the methods and procedures described in the course and to apply the same in order to solve and model simple problems. In the oral exam the student has to prove to be able to illustrate with a proper language, both synthetically and analytically, the mathematical foundations of the numerical methods presented in class.

BASI DI DATI

1° anno – 2° semestre

9 CFU – settore INF/01 – 90 ore di lezione in aula – ulteriori ore di tutorato

Docente: P. Vocca

 **Programma:** Introduzione - Modelli Relazionali - Algebra Relazionale - Calcolo Relazionale - Flusso di progetto di un DB - Modello Concettuale dei Dati - Schema logico di un DB - Entity-relationship Schema - Schema fisico di un DB - Forme Normali - Query language e MySQL - DML - SQL - Organizzazione Fisica dei Dati - Ottimizzazione degli indici - Normalizzazione vs Denormalizzazione - Ottimizzazione delle Query - MySQL e ottimizzazione - Transazioni - Protocolli Two Phases Locking, Timestamp, MVCC - MySQL e Storage Engine - Active Databases - Trigger e Stored Procedure - Cursor, Trigger e Stored Procedure in MySQL - GIS - Distributed Architectures - Protocollo Two Phases Commit - Data Warehouse - Data Mining - Evoluzione dei Database - Basi di dati NoSQL - MongoDB - CRUD operations - Simulazione Progetto.

Obiettivi di apprendimento: Conoscere i modelli di basi di dati. Progettare e utilizzare una base di dati. Aspetti transazionali e basi di dati NoSQL.

Testi consigliati:

Atzeni, Ceri, Fraternali, Paraboschi, Torlone: *Basi di dati - Modelli e linguaggi di interrogazione*, 4th ed., McGraw-Hill

Elmasri, Navathe: *Sistemi di basi di dati, fondamentali e complementi*, 7a ed., Pearson

Modalità di esame: La valutazione dello studente prevede lo svolgimento di un task progettuale seguito da una prova orale nella quale verrà discusso il task progettuale presentato ed approfonditi gli argomenti illustrati durante il corso.

 **Program:** Introduction - Relational Model - Relational Algebra - Relational Calculus - Project flow chart - Data conceptual Model - Logical Design of DB - Entity-relationship Schema - DB Physical Design - Normal Forms - Query language and MySQL - DML - SQL - Data Physical organization - Index Optimization - Normalization vs Denormalization - Query Optimization - MySQL e optimization - Transactions - Two Phases Locking, Timestamp, MVCC - MySQL and Storage Engine - Active Databases - Trigger and Stored Procedure - Cursor, Trigger and Stored Procedure in MySQL - GIS - Distributed Architectures - Two Phases Commit - Data Warehouse - Data Mining - Database Evolution - NoSQL Databases - MongoDB - CRUD operations - Project Simulation.

Learning objectives: Learn database models. Design and use a database. Transactional aspects and NoSQL databases.

Text books:

Atzeni, Ceri, Fraternali, Paraboschi, Torlone: *Basi di dati - Modelli e linguaggi di interrogazione*, 4th ed., McGraw-Hill

Elmasri, Navathe: *Sistemi di basi di dati, fondamentali e complementi*, 7a ed., Pearson

Exam mode: Students are evaluated by assigning a project task to be developed and then discussed in an oral presentation, which also includes questions about the topics illustrated during the course.

ECONOMETRIA

3° anno – 2° semestre

6 CFU – settore SECS-P/05 – 48 ore di lezione in aula

Docente:

 **Programma:**

Obiettivi di apprendimento: Il corso ha l'obiettivo di introdurre gli studenti alle più recenti ed avanzate tecniche per la stima di effetti causali in presenza di dati cross-sezionali e longitudinali.

Learning objectives: The aim of this course is to introduce the student to the state-of-the-art techniques for the estimation of causal effects in both cross-sectional and longitudinal settings.

FISICA E ANALISI DATI

1° anno – 2° semestre

9 CFU – settore FIS/01 – 90 ore di lezione in aula

Docente: F. Archilli (codocente T. Minniti)

 **Programma:** Misura e Unità di Misure. Cinematica: Spostamento, Velocità e Accelerazione. Dinamica: Leggi di Newton, Lavoro ed Energia Cinetica, Energia Potenziale, Energia Meccanica, Quantità di Moto, Urti, Corpo Rigido, Rotazione e Variabili Angolari, Momento di Inerzia, Momento Torcente e Momento Angolare. Cenni di Statica e Dinamica dei Fluidi. Termodinamica: Temperatura, Quantità di calore, Trasformazioni Reversibili e Irreversibili, Primo e Secondo Principio della Termodinamica, L'Entropia. Elettrostatica: Forza di Coulomb, Campo elettrico, Legge di Gauss, Potenziale elettrico, Condensatori e Resistori. Elettromagnetismo: Corrente elettrica, Legge di Ohm ed effetto Joule, Campo Magnetico, Forza di Lorentz, Legge di Laplace, di Biot-Savart, di Ampère e legge di Faraday. Induzione e Induttanza. Equazioni di Maxwell. Analisi degli Errori: Definizione e Propagazione degli Errori, Analisi Statistica degli Errori Casuali, Metodo dei Minimi Quadrati, Covarianza e Correlazione.

Obiettivi di apprendimento: Il corso ha lo scopo di introdurre lo studente ai concetti fondamentali della Fisica classica ed alle sue applicazioni elementari, fornendo le basi necessarie per l'interpretazione dei principali processi fisici e per l'analisi dei dati derivanti da esperimenti di laboratorio di base. Gli studenti impareranno inoltre la programmazione di base per analizzare e gestire dati.

Testi consigliati:

Walker: *Halliday - Resnick: Fondamenti di fisica*, Casa Editrice Ambrosiana

Taylor: *Introduzione all'analisi degli errori*, Zanichelli

Modalità di esame: 2 prove scritte in itinere (valide per superare lo scritto); 1 prova scritta finale; 1 prova orale.

Bibliografia di riferimento:

Walker: *Halliday - Resnick: Fondamenti di fisica*, Casa Editrice Ambrosiana

Taylor: *Introduzione all'analisi degli errori*, Zanichelli

Rosati: *Fisica generale, Volumi I e II*, CEA

Mazzoldi: *Fisica*, Volumi I e II Edises Edizioni, 2023

 **Program:** Measurement and Unit of Measurement. Kinematics: Displacement, Speed and Acceleration. Dynamics: Newton's Laws, Work and Kinetic Energy, Potential Energy, Mechanical Energy, Momentum, Shock, Rigid Body, Rotation and Angular Variables, Moment of Inertia, Torque and Angular Momentum. Outlines of Static and Fluid Dynamics. Thermodynamics: Temperature, Heat, Reversible and Irreversible Transformations, First and Second Principles of Thermodynamics, Entropy. Electrostatics: Coulomb Force, Electric Field, Gauss Law, Electric Potential, Capacitors and Resistors. Electromagnetism: Electric current, Ohm's law and Joule effect, Magnetic field, Lorentz force, Laplace's law, Biot-Savart law, Ampère's law and Faraday's law. Induction and Inductance. Maxwell's equations. Error Analysis: Definition and Propagation of Errors, Statistical Analysis of Random Errors, Least Squares Method, Covariance and Correlation.

Learning objectives: The course aims to introduce the students to the fundamental concepts of classical physics and its elementary applications, providing the bases for possible further courses of the master's degree. The students will also learn to understand Python and perform data analysis and manipulation.

Text books:

Walker: *Halliday and Resnick's Principles of Physics*, Wiley, 2023

Taylor: *An introduction to error analysis*, University Science Books

Exam mode: 2 exams written in itinere (valid for taking the written exam); 1 final written test; 1 oral test.

Reference bibliography:

Walker: *Halliday and Resnick's Principles of Physics*, Wiley, 2023

Taylor: *An introduction to error analysis*, University Science Books

FONDAMENTI DI PROGRAMMAZIONE E LABORATORIO CALCOLO I

1° anno – 1° semestre

9 CFU – settore INF/01 – 90 ore di lezione in aula

Docente: G. Rossi

 **Programma:** Verranno trattati i seguenti temi: risoluzione automatica dei problemi; algoritmi e programmi; modelli di calcolo; linguaggi di programmazione; tipi di linguaggi, struttura di un programma; tipi di dati semplici e strutturati; variabili; strutture di controllo; puntatori; funzioni; ricorsione; operazioni di input/output; strutture di dati elementari. Introduzione al linguaggio di programmazione Python. Algoritmi elementari di ricerca e ordinamento.

Obiettivi di apprendimento: Scopo del corso è quello di introdurre agli studenti il concetto di problema computazionale e di risoluzione automatica, mettendoli in grado di comprendere ed analizzare la struttura di un problema, individuare metodi di risoluzione alternativi, raffrontarli dal punto di vista dell'efficienza, implementarli mediante un opportuno linguaggio di programmazione e valutarne la correttezza. Gli studenti acquisiranno la conoscenza del linguaggio di programmazione Python e delle strutture di dati ed algoritmi elementari. Svilupperanno la capacità di utilizzare le conoscenze acquisite per scegliere le strutture dati migliori e le soluzioni più efficienti dal punto di vista computazionale per risolvere nuovi problemi; analizzarne l'efficienza e verificarne la correttezza. Sapranno sviluppare la capacità di descrivere informalmente le soluzioni algoritmiche utilizzate e la loro implementazione nel linguaggio di programmazione scelto. Infine saranno in grado di acquisire informazioni supplementari da diverse fonti utili per la risoluzione di un problema.

Testi consigliati:

J. V. Guttag: *Introduzione alla programmazione con Python*, EGEA, 2021

Modalità di esame: Prova scritta e orale. Prova di Laboratorio.

 **Program:** It will be treated the following topics: automatic resolution of problems; algorithms and programs; computational models; programming languages; types of programming languages; compilation and interpretation; imperative languages; the structure of a program; simple and structured data types; variables; control structures; pointers; functions; recursion; input/output; elementary data structures. Introduction to the Python programming language. Elementary algorithms of searching and sorting.

Learning objectives: The aim of the course is to introduce students to the concept of computational problem and automated problem solving, enabling them to better understand and analyze the structure of a problem, identify alternative methods of resolution, compare them from the point of view of computational efficiency, implement them by a suitable programming language and evaluate its correctness. Students will acquire knowledge of Python programming language and of data structures and elementary algorithms. They will develop the ability to use the acquired knowledge to choose the best data structures and the most efficient computational solutions to solve new problems; analyze their efficiency and verify their correctness. They will be able to develop the ability to informally describe the algorithmic solutions used and their implementations in the chosen programming language. Finally they will be able to acquire additional informations from different sources useful for solving a problem.

Text books:

Guttag: *Introduzione alla programmazione con Python*, EGEA, 2021

Exam mode: Written and oral exam. Laboratory test.

FONDAMENTI DI PROGRAMMAZIONE E LABORATORIO CALCOLO II

2° anno – 1/2° semestre

9 CFU – settore INF/01 – 90 ore di lezione in aula

Docente: F. M. Zanzotto (codocente H. Speleers)

 **Programma:** Paradigma Dichiarativo: In questa parte del corso, si vuole introdurre lo studente alla programmazione dichiarativa basata sulla logica. Dopo una prima analisi delle differenze dei paradigmi di programmazione procedurali e dichiarativi, viene introdotto il Prolog come un linguaggio dichiarativo. Il linguaggio verrà descritto dal punto di vista sintattico e verranno introdotti i principali tipi di dati e gli

operatori. Verranno descritte delle applicazioni nell'ambito dell'intelligenza artificiale e dell'elaborazione del linguaggio naturale. Verrà infine introdotto il legame con la logica dei predicati e con la logica del prim'ordine.

Paradigma Funzionale: In questa parte del corso, lo studente verrà introdotto ai principi di programmazione funzionale. Il linguaggio utilizzato è il Python che è un linguaggio ibrido che contiene alcuni di questi principi.

Saranno inoltre proposti approfondimenti in Python per il calcolo scientifico e l'analisi dati.

Obiettivi di apprendimento: Il corso intende fornire allo studente una panoramica dettagliata dei linguaggi di programmazione che implementano paradigmi diversi dal solo modello procedurale visto nei corsi precedenti.

Testi consigliati:

Bratko: *Prolog Programming for Artificial Intelligence*, Addison Wesley

Varoquaux, Gouillart, Vahtras, et al.: *Scientific Python Lectures*, disponibile on-line

Modalità di esame: L'esame consta di una prova al calcolatore nella quale si chiede di realizzare dei programmi che soddisfino i requisiti / risolvano i problemi descritti nel testo fornito agli studenti. Successivamente, lo studente discute con i professori la prova effettuata e infine affronta una prova orale sugli aspetti più teorici del corso. Per la parte di approfondimenti in Python lo studente dovrà redigere un piccolo progetto.

 **Program:** Declarative Paradigm - Aim of this part: Declarative Programming as based on Logic. After a first analysis of the differences between procedural programming and declarative programming, we introduce Prolog as the declarative language used to describe the new paradigm. The syntax of Prolog will be introduced and we will analyze the principal datatypes and operators. We will describe the applications to artificial intelligence and natural language processing. Finally, we will analyze the connection between Prolog and Logic.

Functional Paradigm - The aim of this part is to analyze the principal ideas behind functional programming. We will use Python as a host language to minimally describe these ideas.

Features of the Python ecosystem, particularly tailored for scientific computing and data analysis, will be presented as well.

Learning objectives: Acquiring an in-depth knowledge of programming languages that are based on paradigm different from the procedural paradigm.

Text books:

Bratko: *Prolog Programming for Artificial Intelligence*, Addison Wesley

Varoquaux, Gouillart, Vahtras, et al.: *Scientific Python Lectures*, notes available on-line

Exam mode: The exam consists in:

- a test working at the computer in which the student must develop programs respecting the requirements and solving the problems described in the text that is provided;
- a discussion of the program delivered by the student;
- a discussion about the more theoretical aspects of the course;
- a small project for the Python part devoted to scientific computing and data analysis.

GRAFI E COMPLEX NETWORKS

3° anno – 2° semestre

9 CFU – settore MAT/08 – 72 ore di lezione in aula

Docente: MODULO I: A. Clementi - MODULO II: D. Bertaccini

 **Programma:** MODULO I: il Corso presenta i principi fondamentali del calcolo distribuito sia da un punto di vista dei modelli di comunicazione/computazione più importanti che per quanto riguarda i metodi algoritmici fondamentali per tali modelli. L'obiettivo formativo è quello di fornire degli strumenti efficienti e rigorosi per il Problem Solving in cui, rispetto ai corsi algoritmici della triennale, per la prima volta le entità computazionali (agenti) sono molteplici ed interagenti. Questo nuovo paradigma offre ottime basi per progettare protocolli efficienti per tasks fondamentali, tra i quali il broadcast, la leader election, il graph-coloring, ed estremamente attuali nel mondo dei moderni sistemi distribuiti. Si studieranno alcuni protocolli di diffusione di informazioni e di consenso su vari tipi di grafi che sono utilizzati e/o osservati su importanti esempi di sistemi distribuiti sia artificiali (robot swarms) che naturali (colonie di insetti). Verranno analizzati pertanto i cosiddetti processi epidemici nelle reti sociali. Verranno mostrati alcuni

esempi di "comportamento auto-organizzante" e di "intelligenza distribuita" che sono tipici dei sistemi complessi generati da regole locali semplici. Inoltre, verranno analizzati altri modelli e tasks computazionali adatti per l'analisi dei "Big-Data".

MODULO II: Algebra lineare numerica e funzioni di matrici per algoritmi per grafi e complex network. Le principali matrici associate ai grafi delle reti; algoritmi di base per grafi di grandi dimensioni applicati alle reti complesse; indici di centralità per le reti; algoritmi efficienti per il calcolo e l'aggiornamento del ranking dei dati nelle reti complesse; Network communicability; processi di evoluzione nei grafi delle network; matrice laplaciana nei processi di diffusione, trasporto e random walk; applicazioni.

Obiettivi di apprendimento: Il corso ha come obiettivi l'apprendimento dei principali metodi e strumenti algoritmici per l'analisi e la gestione efficiente dei Sistemi Distribuiti (Complex Nets)

Testi consigliati:

Leskovec, Rajaraman, Ullmann: *Mining of Massive Data Sets*, Cambridge University Press, 2020

Mitzenmacher, Upfal: *Probability and Computing*, Cambridge University Press

Santoro: *Design And Analysis of Distributed Algorithms*, Wiley, 2006

Bertaccini, Filippo: *Ranking in network analysis*, preprint, 2025

Modalità di esame: Progetto e prova orale

 **Program:** MODULE I: The course presents the fundamental principles of distributed computing both from the point of view of the most important communication/computation models and with regard to the fundamental algorithmic methods for these models. The training objective is to provide efficient and rigorous tools for Problem Solving in which, compared to the three-year algorithmic courses, for the first time the computational entities (agents) are multiple and interacting. This new paradigm offers excellent foundations for designing efficient protocols for fundamental tasks, including broadcast, leader election, graph-coloring, and are extremely current in the world of modern distributed systems. We will study some information dissemination and consensus protocols on various types of graphs that are used and/or observed on important examples of distributed systems, both artificial (robot swarms) and natural (insect colonies). The so-called epidemic processes in social networks will therefore be analysed. We will show some examples of "self-organizing behavior" and "distributed intelligence" which are typical of complex systems generated by simple local rules. Furthermore, other models and computational tasks suitable for the analysis of "Big-Data" will be analyzed

MODULE II: Numerical linear algebra and matrix function for graph and complex network algorithms. Main matrices associated with network graphs; basic algorithms for large graphs applied to complex networks; centrality indices for networks; efficient algorithms for computing and updating the ranking of data in complex networks; Network communicability; evolution processes in network graphs; the Laplaciana matrix in diffusion and transport on networks and random walks; application.

Learning objectives: the main learning goal of the course is the study of models and algorithmic tools for the management of Distributed Systems and Complex Networks

Text books:

Leskovec, Rajaraman, Ullmann: *Mining of Massive Data Sets*, Cambridge University Press, 2020

Mitzenmacher, Upfal: *Probability and Computing*, Cambridge University Press

Santoro: *Design And Analysis of Distributed Algorithms*, Wiley, 2006

Bertaccini, Filippo: *Ranking in network analysis*, preprint, 2025

Exam mode: Project and oral exam

INTRODUZIONE ALL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE E MACHINE LEARNING CON LABORATORIO

3° anno – 1° semestre

9 CFU – settore INF/01 – 90 ore di lezione in aula

Docente: R. Basili

 Programma:

Obiettivi di apprendimento: Lo studente è atteso apprendere i fondamenti, i paradigmi logico-matematici, le tecnologie e le principali applicazioni della disciplina nota come Intelligenza Artificiale, dedicata alla automazione dei comportamenti intelligenti dell'uomo attraverso la algoritmica dei sistemi software. Il Corso produce una panoramica completa dell'area fornendo alcuni approfondimenti su problemi e soluzioni efficienti della IA nelle applicazioni moderne del software. Ad alcuni richiami ai fondamenti di

algebra e di logica, il Corso associa una introduzione alle tecnologie di programmazione che sono alla base dei sistemi basati su conoscenza. Al termine del corso, lo studente avrà acquisito le competenze necessarie per comprendere la progettazione di sistemi intelligenti in applicazioni moderne, ad esempio Web, incluse le tecnologie di ragionamento, di apprendimento e di pianificazione, che sono centrali nello sviluppo di sistemi software intelligenti ed autonomi (*conoscenza e capacità di comprensione*). In particolare, lo studente avrà avuto modo di apprendere gli strumenti e le tecnologie per progettare tali sistemi secondo lo svolgimento di esercizi e piccoli di progetti su processi intelligenti di media complessità (*capacità di applicare conoscenza e comprensione*). Il Corso fa riferimento a problemi algoritmici molto complessi tipici della intelligenza dell'uomo (ad es. il riconoscimento e la classificazione dei fenomeni semantici nell'agire linguistico) e richiede la individuazione degli elementi essenziali di tali processi, mirando a realizzare una forte *autonomia di giudizio* nello studente, obbiettivo rilevante del Corso. Osserviamo che la analisi richiesta nella progettazione logica dei workflow intelligenti coinvolti dal Corso corrisponde ad un processo molto complesso e stimola la capacità di interpretazione dei comportamenti e dei dati, amplificando dunque in modo sistematico le *abilità comunicative* dello studente. La *capacità di apprendimento* in questo Corso è dunque stimolata in modo significativo sia nei processi interpretativi che nei processi di progettazione: i flussi algoritmici avanzati presentati variano infatti da applicazioni ad algoritmica complessa (ad esempio problemi di ragionamento logico per la pianificazione) a metodi guidati dai dati (Machine Learning) e consentono allo studente metodi critici ed analitici in fronti molto diversi ed ugualmente importanti delle moderne ICTs.

Program:

Learning objectives: The student will learn the fundamentals, the logical and mathematical paradigms, the technologies as well as the main applications of AI, the discipline focused on the computational automation of the intelligent human behaviours. The Course aims to present a general overview of the area by providing in depth treatment of some AI solutions and technologies widely adopted within current ICT scenarios. After an initial recall to basic notions of algebra and logic, the Course will introduce the programming principles used in the design and development of intelligent systems. At the end of the course, the student will be able to understand principles, methods and practices behind the design of intelligent agents, including paradigms for knowledge modelling, reasoning and machine learning. (*Knowledge and Understanding*). In particular, the student will be acquainted with tools and technologies for designing such applications in scenarios with medium level complexity (*Applying Knowledge and Understanding*). The course makes reference to application scenarios widely studied and will require for the student to understand basic principles in the underlying logical reasoning methods or Machine Learning processes: this aims at strengthen the students judgment autonomy (*Making Judgments*), that is considered as a main target of the Course. The design of the class of intelligent agent applications studied in the Course involves complex information workflows that are increasingly common in the current industrial or organisational practices. The above competencies include various design abilities, from the interpretation of domain information to the modelling of ontological data properties. These are considered crucial to increase the *communication skills* of the student. Finally, the above design is also connected with wide algorithmic aspects, ranging from complex rule based, i.e. deductive, mechanisms to complex Machine Learning (i.e. data-driven, inductive) methods: this allows to stimulate the student ability of learning novel algorithmic aspects along both dimensions in an integrated and more natural manner in future studies.

MACHINE LEARNING

3° anno – 2° semestre

6 CFU – settore INF/01 – 48 ore di lezione in aula

Docente: G. Rossi

 **Programma:** Introduzione al ML + K-Nearest Neighbors (KNN) Concetti base + primo modello semplice e intuitivo. Alberi Decisionali e Foreste Casuali Modelli interpretabili e potenti, introduzione all'ensemble learning. Preprocessing e Bilanciamento Dati Preparazione dei dati reali: scaling, codifica, dati sbilanciati. Regolarizzazione e Feature Selection Controllo della complessità del modello, selezione automatica delle variabili. Riduzione della dimensionalità con PCA Visualizzazione e compressione dell'informazione. Valutazione Modelli e Iperparametri Metriche, validazione incrociata, ottimizzazione iperparametri. Regressione (lineare, polinomiale, Lasso/Ridge) Modelli predittivi per variabili continue. Perceptron e Adaline Inizio dei modelli lineari "neurali", primi concetti di ottimizzazione. Regressione Logistica e SGD

Dalla classificazione lineare al concetto di probabilità e perdita logistica. SVM e Kernel Methods Margine massimo, hinge loss e kernel trick. Reti Neurali Artificiali e Backpropagation Modelli multilivello, retropropagazione e funzioni di attivazione. Clustering e DBSCAN Apprendimento non supervisionato e scoperta di strutture nei dati.

Obiettivi di apprendimento: Il corso si propone di fornire agli studenti una solida comprensione dei fondamenti teorici e pratici del Machine Learning, con un'enfasi particolare sull'implementazione algoritmica da zero e sulla dimostrazione rigorosa dei principali risultati matematici. Gli studenti svilupperanno una comprensione critica dei modelli e delle tecniche di apprendimento automatico, sia supervisionato che non supervisionato, privilegiando l'intuizione, la formalizzazione e la capacità di progettare soluzioni algoritmiche autonome.

Testi consigliati:

Raschka, Mirjalili: *Machine Learning con Python – Nuova edizione: Costruire algoritmi per generare conoscenza*, Apogeo, 2020

Modalità di esame: L'esame consiste in una prova pratica, consegnata 10 giorni prima della data dell'orale, seguita da un colloquio orale. La prova pratica fungerà da base di partenza per la discussione orale e non ha carattere di prova di sbarramento. Durante l'orale verranno approfonditi sia i contenuti della prova pratica sia gli aspetti teorici del corso, con domande volte a valutare la comprensione complessiva, la capacità di applicazione e l'approfondimento critico degli argomenti trattati.

 **Program:** Introduction to ML + K-Nearest Neighbors (KNN) Basic concepts + first simple and intuitive model. Decision Trees and Random Forests Interpretable and powerful models, introduction to ensemble learning. Preprocessing and Data Balancing Real data preparation: scaling, encoding, imbalanced data. Regularization and Feature Selection Controlling model complexity, automatic variable selection. Dimensionality Reduction with PCA Data visualization and information compression. Model Evaluation and Hyperparameters Metrics, cross-validation, hyperparameter optimization. Regression (linear, polynomial, Lasso/Ridge) Predictive models for continuous variables. Perceptron and Adaline Introduction to linear “neural” models, first optimization concepts. Logistic Regression and SGD From linear classification to probability concepts and logistic loss. SVM and Kernel Methods Maximum margin, hinge loss, and kernel trick. Artificial Neural Networks and Backpropagation Multilayer models, backpropagation, and activation functions. Clustering and DBSCAN Unsupervised learning and discovering structures in data.

Learning objectives: The course aims to provide students with a solid understanding of the theoretical and practical foundations of Machine Learning, with a particular emphasis on algorithmic implementation from scratch and rigorous demonstration of key mathematical results. Students will develop a critical understanding of both supervised and unsupervised learning models and techniques, with a focus on intuition, formalization, and the ability to design autonomous algorithmic solutions.

Text books:

Raschka, Mirjalili: *Python Machine Learning (3rd ed.)*, Packt Publishing, 2019

Exam mode: The exam consists of a practical assignment, delivered 10 days before the oral exam, followed by an oral interview. The practical assignment serves as a starting point for the oral discussion and is not a pass/fail test. During the oral exam, both the contents of the practical assignment and the theoretical aspects of the course will be explored, with questions aimed at assessing overall understanding, application skills, and critical insight into the topics covered.

METODI DI APPROSSIMAZIONE PER BIG DATA

3° anno – 1° semestre

9 CFU – settore MAT/08 – 72 ore di lezione in aula

Docente: C. Manni (codocente H. Speleers)

 **Programma:** Il corso fornisce un'introduzione alla costruzione ed alle proprietà delle funzioni spline nonché al loro utilizzo nell'ambito della grafica computerizzata, della progettazione e dell'approssimazione di dati. Polinomi di Bernstein e curve di Bézier. B-spline: costruzione, proprietà analitiche e geometriche. Curve e superfici B-spline. Curve e superfici NURBS. Proprietà di approssimazione di spazi spline.

Obiettivi di apprendimento: L'insegnamento si propone di fornire le conoscenze di base a riguardo delle funzioni spline e di alcune loro applicazioni salienti. Al termine dell'insegnamento, lo studente

conoscerà le principali proprietà delle funzioni splines, della base B-spline e i principali aspetti delle loro applicazioni nell'ambito del free-form design e dell'approssimazione di funzioni e dati

Testi consigliati:

C. Manni, H. Speleers: *Standard and Non-Standard CAGD Tools for Isogeometric Analysis: A Tutorial*, Springer Lecture Notes in Mathematics 2161, pp. 1–69, 2016

T. Lyche, C. Manni, H. Speleers (eds.): *Splines and PDEs: from Approximation Theory to Numerical Linear Algebra*, Springer Lecture Notes in Mathematics 2219, 2018

Modalità di esame: Prova orale. Nella prova orale lo studente dovrà dimostrare di saper illustrare, sia in modo sintetico che analitico, e con proprietà di linguaggio i fondamenti matematici dei metodi numerici presentati a lezione. Il punteggio della prova d'esame è attribuito mediante un voto espresso in trentesimi.

Bibliografia di riferimento:

C. de Boor: *A Practical Guide to Splines*, Springer, 2001

A. Quarteroni: *Numerical Models for Differential Problems*, Springer, 2009

 **Program:** The course provides an introduction to the construction and properties of spline functions as well as their use in geometric modeling and approximation. Bernstein polynomials and Bézier curves. B-spline: construction, analytical and geometric properties. B-spline curves and surfaces. NURBS curves and surfaces. Approximation properties of spline spaces.

Learning objectives: The course aims to provide basic knowledge about splines and some of their salient applications. At the end of the course, the student will know the main properties of splines functions, of the B-spline basis and the main aspects of their applications to free-form design and approximation of functions and data .

Text books:

C. Manni, H. Speleers: *Standard and Non-Standard CAGD Tools for Isogeometric Analysis: A Tutorial*, Springer Lecture Notes in Mathematics 2161, pp. 1–69, 2016

T. Lyche, C. Manni, H. Speleers (eds.): *Splines and PDEs: from Approximation Theory to Numerical Linear Algebra*, Springer Lecture Notes in Mathematics 2219, 2018

Exam mode: Oral exam. In the oral exam the student has to prove to be able to illustrate with a proper language, both synthetically and analytically, the mathematical foundations of the numerical methods presented in class. The exam score is given by a mark expressed in thirtieths.

Reference bibliography:

C. de Boor: *A Practical Guide to Splines*, Springer, 2001

A. Quarteroni: *Numerical Models for Differential Problems*, Springer, 2009

METODI MATEMATICI PER LA FINANZA

3° anno – 1° semestre

9 CFU – settore SECS-S/06 – 72 ore di lezione in aula

Docente: B. Torti (codocente L. Caramellino)

 **Programma:** Cenni di teoria della misura: algebre e sigma-algebre; spazi misurabili e funzioni misurabili. Richiami di Probabilità. Spazi di probabilità. Variabili aleatorie come funzioni misurabili. Sigma-algebre indipendenti. Aspettazione condizionale. Martingale, supermartingale e submartingale; la decomposizione di Doob ed il compensatore. Tempi d'arresto: processi arrestati; il teorema d'arresto. Tassi di interesse. Contratti forward, opzioni. Modelli discreti per la finanza. Strategie di gestione. L'arbitraggio. Strategie replicanti. Opzioni europee: il primo teorema fondamentale dell'asset pricing; la completezza del mercato ed il secondo teorema fondamentale dell'asset pricing. Il modello CRR (Cox, Ross e Rubinstein): calcolo del prezzo delle opzioni, comportamento asintotico e convergenza alle formule di Black e Scholes. Opzioni americane nei mercati completi: formulazione del prezzo e formula della funzione-prezzo della put americana nel modello CRR. Calcolo delle strategie replicanti per le opzioni. Metodi numerici per la finanza. Principio di programmazione dinamica e metodi Monte Carlo. Implementazione al calcolatore di problemi numerici (prezzo e copertura di opzioni europee e americane di vari tipi, ad esempio tipo vaniglia, asiatiche e con barriere).

Obiettivi di apprendimento: Comprensione del linguaggio proprio della finanza matematica; conoscenza dei modelli discreti per la finanza e della risoluzione dei principali problemi legati alle opzioni, cioè calcolo del prezzo e della copertura.

Testi consigliati:

Baldi, Caramellino: *Appunti del corso*, distribuiti dal docente .

Modalità di esame: Prova orale e progetto. La valutazione dello studente prevede una prova orale in cui vengono proposte domande atte a valutare la conoscenza della materia, la capacità di fare collegamenti con strumenti matematici connessi e con problemi reali. La valutazione comprende anche una discussione sui problemi numerici proposti, che lo studente deve aver risolto tramite un progetto algoritmico sviluppato con un linguaggio di programmazione (ad esempio C) e consegnato al docente dieci giorni prima di sostenere l'esame. Il punteggio della prova d'esame è attribuito mediante un voto espresso in trentesimi. Nella valutazione dell'esame, la determinazione del voto finale tiene conto: l'utilizzo competente della matematica; la correttezza della procedura individuata per la soluzione dei problemi numerici; l'utilizzo competente del linguaggio della finanza; la capacità di sintesi; la capacità di istituire collegamenti con altri aspetti della matematica; la chiarezza espositiva.

Bibliografia di riferimento:

D. Lamberton, B. Lapeyre: *Introduction to stochastic calculus applied to finance*, Chapman & Hall, 2008

J. C. Hull: *Options, futures and other derivatives. 5th edition*, Prentice Hall, 2002

S. M. Ross: *An elementary introduction to Mathematical Finance. Options and other topics. 2nd edition*, Cambridge University Press, 2003

A. Pascucci, W. J. Runggaldier: *Finanza matematica. Teoria e problemi per modelli multiperiodali*, Springer Universitext, 2009



Program: Elements of measure theory: algebras and sigma-algebras; measurable spaces and measurable functions. Recalls of Probability. Probability spaces. Random variables as measurable functions. Independence among sigma-algebras. Conditional expectation. Martingale, supermartingale and submartingale; Doob's decomposition and compensator. Stopping times: Stopped process; the stopping theorem. Interest rates. Forward contracts, options. Discrete models for finance. Trading strategies. Arbitrage. Replicating strategies. European options: the first fundamental theorem of asset pricing; market completeness and the second fundamental theorem of asset pricing. The CRR model (Cox, Ross and Rubinstein): option pricing, asymptotic behavior and convergence to the Black and Scholes formulas. American options in complete markets: price formulation and function-price formula for the American put in the CRR model. Calculation of replicating strategies for options. (approx. 4 hours) Numerical methods for finance. Dynamic programming principle and Monte Carlo methods. Computer implementation of numerical problems (pricing and hedging of European and American options of various types, e.g. vanilla, Asian and barriers).

Learning objectives: Understanding of the mathematical finance language; knowledge of discrete models for finance, in particular for solving the most common problems related to options, that is pricing and hedging.

Text books:

Baldi, Caramellino: *Appunti del corso*, distribuiti dal docente

Exam mode: Oral exam and project. The student's assessment includes an oral test in which questions are proposed to assess the knowledge of the subject, the ability to make connections with the mathematical tools and with real problems. The evaluation also includes a discussion on the assigned numerical problems, which the student must have solved through an algorithmic project developed with a programming language (for example C) and delivered ten days before the exam is held. The score of the exam is given by a mark expressed in thirtieths. In the evaluation of the exam the determination of the final grade takes into account: the competent use of mathematics; the correctness of the procedure identified for the solution of numerical problems; the competent use of the language of finance; the capacity for synthesis; the ability to establish links with other aspects of mathematics; clarity of exposition.

Reference bibliography:

D. Lamberton, B. Lapeyre: *Introduction to stochastic calculus applied to finance*, Chapman & Hall, 2008

J. C. Hull: *Options, futures and other derivatives. 5th edition*, Prentice Hall, 2002

S. M. Ross: *An elementary introduction to Mathematical Finance. Options and other topics. 2nd edition*, Cambridge University Press, 2003

A. Pascucci, W. J. Runggaldier: *Finanza matematica. Teoria e problemi per modelli multiperiodali*, Springer Universitext, 2009

1° anno – 2° semestre

9 CFU – settore MAT/06 – 90 ore di lezione in aula

Docente: B. Pacchiarotti (codocente L. Caramellino)

 **Programma:** Introduzione e generalità. Spazi di probabilità, assiomi fondamentali, probabilità condizionata, indipendenza, formula di Bayes. Variabili aleatorie: valore atteso, varianza, densità discreta, funzione di ripartizione. Variabili aleatorie discrete: Bernoulli, Binomiale, Poisson, ipergeometrica, geometrica, binomiale negativa. Variabili aleatorie continue: funzione di densità. Variabile aleatoria uniforme, esponenziale, Gamma, Gaussiana. Disuguaglianze fondamentali. Convergenza e teoremi limite: legge dei grandi numeri e teorema del limite centrale. Cenni alle catene di Markov. Simulazione e metodi Monte Carlo.

Obiettivi di apprendimento: Illustrare i concetti di base del calcolo delle probabilità e i principali metodi di simulazione.

Testi consigliati:

P. Baldi: *Calcolo delle Probabilità e Statistica*, 2a ed., McGraw-Hill

Modalità di esame: Le conoscenze degli studenti saranno verificate attraverso una prova scritta strutturata in esercizi, che verteranno sugli argomenti trattati nel corso e in una prova orale per testare la comprensione di alcuni concetti basilari.

 **Program:** Introduction and generalities. Probability spaces, fundamental axioms, conditional probability, independence, Bayes formula. Random variables: expected value, variance, discrete density, distribution function. Discrete random variables: Bernoulli, Binomial, Poisson, hypergeometric, geometric, negative binomial. Continuous random variables: density function. Uniform random variable, exponential, Gamma, Gaussian. Fundamental inequalities. Convergence and limit theorems: law of large numbers and central limit theorem. Introduction to Markov chains. Simulation and Monte Carlo methods.

Learning objectives: To illustrate the basic concepts of probability calculation and the main simulation methods.

Text books:

P. Baldi: *Calcolo delle Probabilità e Statistica*, 2a ed., McGraw-Hill

Exam mode: The students' knowledge will be verified through a written test structured in exercises, which will focus on the topics covered in the course and in an oral exam to test the understanding of some basic concepts.

PROBABILITÀ E STATISTICA II

2° anno – 2° semestre

9 CFU – settore MAT/06 – 90 ore di lezione in aula

Docente: M. Salvi

 **Programma:** Seguiremo il testo “Probability and computing” di Mitzenmacher e Upfal.
PARTE 1) La prima parte del corso sarà un richiamo degli strumenti di teoria delle probabilità (corrispondenti grossomodo ai primi tre capitoli del libro) ed uno studio delle disuguaglianze di concentrazione (capitolo 4).
PARTE 2) Seguiranno poi argomenti più avanzati, motivati da applicazioni informatiche. A seconda del tempo a disposizione tratteremo una parte dei seguenti argomenti: urne e grafi aleatori (capitolo 5), catene di Markov e passeggiate aleatorie (capitolo 7), teoria dell'informazione (capitolo 10), metodo Montecarlo (capitolo 11), tempo di mixing (capitolo 12), martingale (capitolo 13), funzioni Hash (capitolo 15).

Obiettivi di apprendimento: introdurre agli studenti le tecniche ed i metodi più avanzati della probabilità per applicazioni statistiche, con particolare riferimento alla teoria asintotica ed all'analisi dei processi aleatori più importanti per le simulazioni e la stima (catene di Markov, processo di Poisson).

Testi consigliati:

M. Mitzenmacher, E. Upfal: *Probability and Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press

Modalità di esame: Prova scritta e orale.

Bibliografia di riferimento:

M. Mitzenmacher, E. Upfal: *Probability and Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press

D. A. Levin, Y. Peres, E. L. Wilmer: *Markov Chains and Mixing Times*, 2nd edition



Program: We will follow the text “Probability and Computing” by Mitzenmacher and Upfal.

PART 1) The first part of the course will be a review of probability theory tools (roughly corresponding to the first three chapters of the book) and a study of concentration inequalities (chapter 4).

PART 2) We will then cover more advanced topics motivated by computer science applications. Depending on the time available, we will address some of the following topics: urns and random graphs (chapter 5), Markov chains and random walks (chapter 7), information theory (chapter 10), Monte Carlo method (chapter 11), mixing time (chapter 12), martingales (chapter 13), Hash functions (chapter 15).

Learning objectives: We aim to introduce students to the more advanced techniques in probability and their applications to statistics, with particular reference to asymptotic theory and stochastic processes and their use for the evaluation of estimators and stochastic simulations.

Text books:

M. Mitzenmacher, E. Upfal: *Probability and Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press

Exam mode: Written and oral exam.

Reference bibliography:

M. Mitzenmacher, E. Upfal: *Probability and Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press

D. A. Levin, Y. Peres, E. L. Wilmer: *Markov Chains and Mixing Times*, 2nd edition

STATISTICA I

2° anno – 1° semestre

9 CFU – settore MAT/06 – 90 ore di lezione in aula

Docente: D. Marinucci



Programma: Introduzione - richiami di teoria asintotica. Proprietà degli stimatori: principio di verosimiglianza, sufficienza, non-distorsione, efficienza. Teorema di Cramer-Rao, matrice di informazione di Fisher. Stimatore di massima verosimiglianza, proprietà asintotiche. Statistica Bayesiana. Test delle ipotesi e intervalli di confidenza. Il modello lineare, stimatori OLS e GLS. Statistica nonparametrica.

Obiettivi di apprendimento: Il corso fornisce una introduzione ai temi classici della statistica ed ai suoi fondamenti matematici.

Testi consigliati:

Wasserman: *All of Statistics*, Springer

Modalità di esame: Prova scritta e orale.



Program: Introduction - asymptotic theory. Estimators and their properties: likelihood principle, sufficiency, unbiasedness, efficiency. Cramer-Rao theorem, Fisher information. Maximum likelihood and its asymptotic properties. Bayesian statistics. Hypothesis testing and confidence intervals. Linear models, OLS and GLS estimators. Nonparametric statistics.

Learning objectives: The aim of this course is to provide an introduction to the theory of statistics and its mathematical foundations.

Text books:

Wasserman: *All of Statistics*, Springer

Exam mode: Written and oral exam.

Didattica programmata

Per ulteriori informazioni sugli insegnamenti previsti per il 3° anno (didattica programmata) si veda la sezione apposita del sito web del Corso di Laurea.